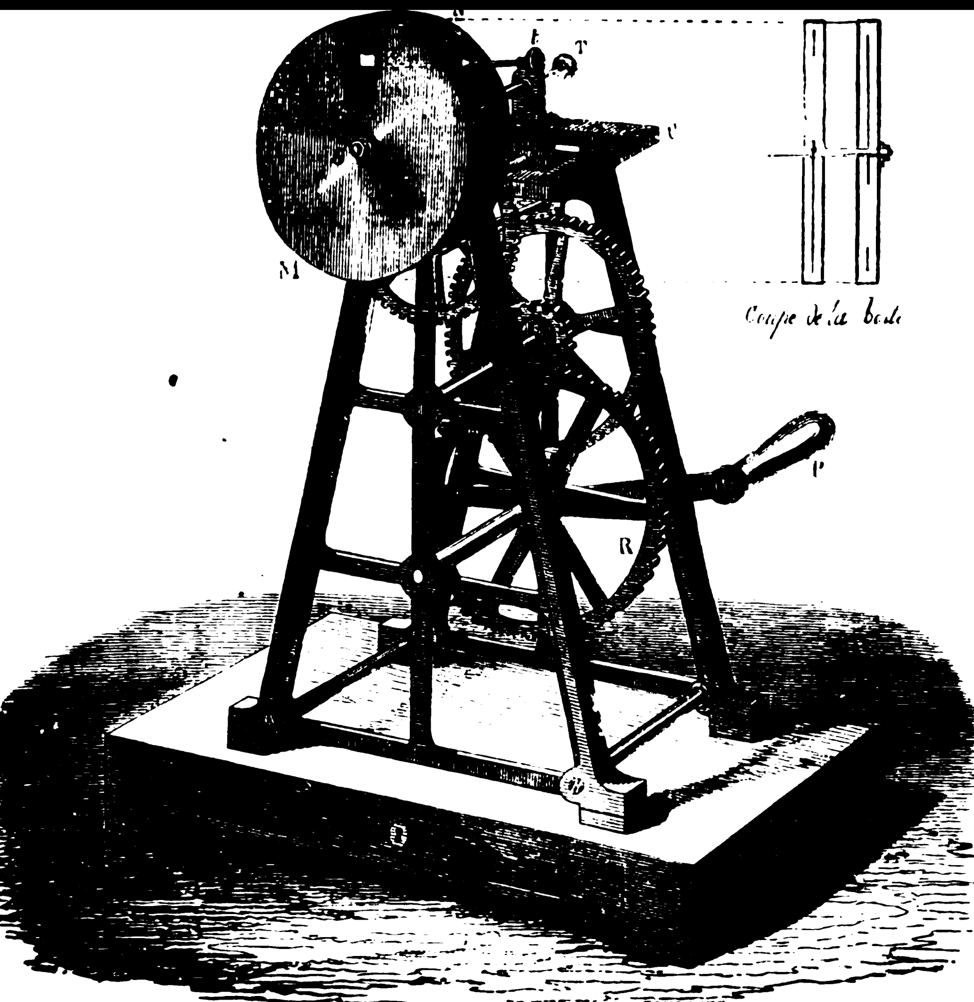
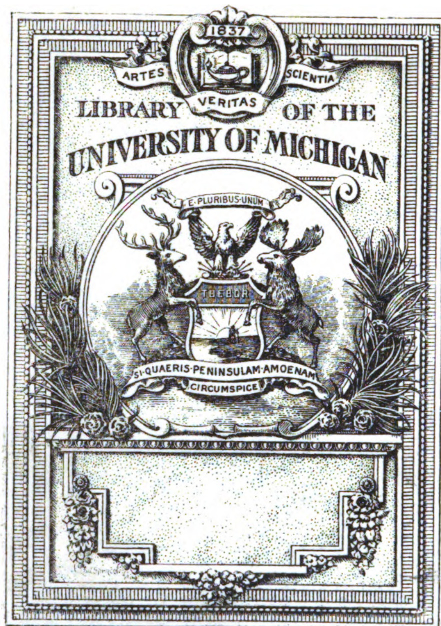



# *Leçons de chimie*

Société chimique de France


1837
ARTES
VERITAS
SCIENTIA
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
E PLURIBUS UNUM
TUEBOR
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE

LEÇONS

# DE CHIMIE

ET DE PHYSIQUE

## A LA MÊME LIBRAIRIE :

**Leçons de Chimie** professées en 1860 à la Société chimique de Paris, par MM. Pasteur, Cahours, Würtz, Berthelot, Sainte-Claire Deville, Barral et Dumas. — *Sujets des leçons :* Recherches sur la dissymétrie moléculaire des produits organiques naturels. — Histoire des radicaux organiques. — Recherches sur les glycols. — De la synthèse en chimie organique. — Des lois de nombres en chimie et de la variation de leurs constantes. — De l'influence exercée par l'atmosphère sur la végétation. — Pièces historiques concernant Lavoisier et N. Le Blanc. 1 volume in-8. Prix, broché, 6 francs.

Ouvrage dont l'introduction dans les écoles est autorisée par le Ministre de l'instruction publique.

Paris. — Imprimerie de Ch. Lahure et C$^{ie}$, rue de Fleurus, 9

SOCIÉTÉ CHIMIQUE DE PARIS

# LEÇONS
# DE CHIMIE
## ET DE PHYSIQUE

PROFESSÉES EN 1861

PAR MM.

JAMIN, DEBRAY, LISSAJOUS, CLOEZ, EDM. BECQUEREL
ET PASTEUR

SUJETS DES LEÇONS :

Lois de l'équilibre et du mouvement des liquides dans les corps poreux.
Sur la production des températures élevées et sur la fusion du platine.
Sur l'étude optique des sons.
Recherches sur la nitrification et considérations générales sur le rôle des nitrates dans la végétation.
Effets lumineux qui résultent de l'action de la lumière sur les corps.
Sur les corpuscules organisés qui existent dans l'atmosphère, examen de la doctrine des générations spontanées.

LIBRAIRIE DE L. HACHETTE ET C^IE
PARIS, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 77
LONDRES, 18, KING WILLIAM STREET, STRAND
LEIPZIG, 15, POST STRASSE

1862

# INTRODUCTION.

La Société chimique offre au public avec confiance le recueil des leçons professées dans son sein pendant l'année 1861.

Ces conférences, où les auteurs des travaux qui ont excité l'attention publique viennent les exposer eux-mêmes et dans lesquelles nos professeurs les plus habiles se disputent l'honneur de servir d'interprètes aux découvertes faites à l'étranger, ces conférences d'un genre nouveau pour la France, ont eu le succès le plus complet.

L'Institut, les professeurs et les chefs de nos grandes écoles, les membres les plus éminents de la société polie de Paris, réunis spontanément, confondus au milieu de jeunes élèves ou de savants au début de la carrière, ont constitué un de ces auditoires d'élite, dont l'approbation délicate qui ne se prodigue pas, prélude, quand elle se donne, aux plus hautes récompenses de l'opinion publique.

Toute nouveauté sérieuse y trouve des imaginations vives, prêtes à l'accueillir; toute vue générale, des esprits exercés, capables d'en fixer l'importance; toute expérience féconde des mains habiles pour en assurer le succès.

Il n'y a donc pas à s'étonner que les conférences de la Société chimique, dont le début modeste s'effectuait, il y a deux ans, en présence de quelques auditeurs attirés par la nouveauté, les aient tous conservés et qu'elles poursuivent aujourd'hui leur succès, devant un public toujours plus nombreux et plus animé.

Elles répondent, en effet, à un besoin que ni les cours publics, ni les académies ne sauraient satisfaire.

Dans les cours publics, on ne peut pas détacher une leçon de celles qui la précèdent ou de celles qui la suivent; chaque cours forme un tout dont les diverses parties sont unies entre elles par mille liens souvent inaperçus, mais qui n'en rendent pas moins difficile l'intelligence d'une séance isolée, pour un auditeur improvisé, qui l'aborde inopinément en vue d'un sujet circonscrit.

S'agit-il d'une découverte qui vient tout à coup enrichir la science, quel est le professeur qui trouverait convenable, en vue de la rendre plus promptement accessible, de suspendre l'ordre des idées de son cours, d'en déflorer les futures le-

çons et d'y intercaler hors de leur place naturelle des démonstrations que la marche de son enseignement n'appelle pas?

Il est donc à côté des devoirs du professeur chargé d'une chaire publique d'autres devoirs d'une nature plus indépendante et plus libre, qui pourraient donner naissance à un enseignement supérieur que l'Angleterre possède depuis longtemps, que la France pouvait lui envier, mais dont la Société chimique a fait voir que l'organisation était facile en France, à Paris du moins.

C'est ce grand et libéral enseignement que la Société royale de Londres, l'Institution royale, la société pour l'avancement des sciences, et d'autres associations scientifiques distribuent dans la métropole ou dans les principales villes de l'Angleterre avec une incontestable autorité et une parfaite intelligence des besoins de notre époque. La Société royale, en imposant souvent à ses lauréats l'obligation d'exposer dans une leçon publique les découvertes pour lesquelles ils sont couronnés; l'Institution royale et ses émules, en désignant pour porter la parole dans leurs conférences, auxquelles les plus grands personnages s'honorent d'assister, les savants les plus éminents de l'Angleterre ou même du reste de l'Europe, appelés, avec l'autorité qui leur appartient et par une exposition d'une sobriété puissante à popu-

lariser ainsi les acquisitions de la philosophie naturelle ou de la science pratique.

La Société chimique s'est inspirée de ces modèles. Elle a voulu prouver que dans notre pays, le zèle des jeunes savants ne ferait pas défaut à l'accomplissement d'une pareille mission et que la faveur publique était assurée à leurs conférences. Sans écarter systématiquement les objets d'une application pratique immédiate, elle a cherché surtout à honorer les découvertes de la science pure, soit qu'elle ait demandé à leurs auteurs d'en faire l'exposé, soit qu'elle ait prié quelque jeune maître de résumer devant elle les travaux accomplis à l'étranger dans des voies nouvelles.

La Société chimique sait trop par quels liens étroits toutes les sciences sont unies pour avoi- jamais eu la pensée que ses conférences demeureraient renfermées dans le domaine de la chimie proprement dite.

Elle a sollicité le concours des physiciens et elle a vu avec reconnaissance leur empressement fraternel répondre à son appel. A côté de la conférence consacrée par M. Debray à faire connaître les belles études auxquelles M. Henry Sainte-Claire Deville l'a associé pour la production des hautes températures, et des savantes recherches de M. Cloëz sur la nitrification, on trouvera dans ce volume des leçons de M. Lissajous sur l'optique des sons; de M. E. Becquerel sur la phosphores-

cence; de M. Jamin, sur les actions capillaires; enfin de M. Pasteur, sur les générations spontanées.

Le nom de ces savants éminents, l'éclat de leurs découvertes, le succès de leurs efforts pour en rendre l'exposé accessible, tout en conservant à la pensée sa hauteur, et à la science sa dignité, justifient l'intérêt croissant que le public témoigne à notre nouvelle institution.

La Société chimique a donc montré que les vérités abstraites, à l'égal des découvertes utiles, gagnent à être popularisées par une parole autorisée et respectée. Elle a prouvé qu'en France le dévouement des maîtres de la science n'était pas invoqué en vain pour l'accomplissement de cette mission et que de son côté la faveur publique savait honorer tout travail noble, élevé, sérieux et fécond de son attention respectueuse et de ses applaudissements reconnaissants.

J. Dumas,
Président de la Société.

# LEÇONS

SUR

# LES LOIS DE L'ÉQUILIBRE

ET

## DU MOUVEMENT DES LIQUIDES

## DANS LES CORPS POREUX

PROFESSÉES LES 22 FÉVRIER ET 8 MARS 1861

DEVANT LA SOCIÉTÉ CHIMIQUE DE PARIS.

**PAR M. JAMIN**

PROFESSEUR DE PHYSIQUE A L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

# PREMIÈRE LEÇON.

MESSIEURS,

Si l'on examine la structure des tissus qui composent les organes animaux et végétaux, on y trouve des canaux extrêmement minces, anastomosés entre eux, et dont les parois elles-mêmes sont poreuses. Ces canaux et ces tissus sont remplis par des liquides et par des gaz, et il est évident que les forces dites capillaires doivent jouer un rôle important dans les phénomènes physiques de la vie animale et végétale.

Ce rôle est loin d'être connu. Jusqu'à présent, en effet, on n'a traité les actions capillaires que dans des cas simples et restreints, et on les a considérées plutôt au point de vue de leurs lois mathématiques que sous le rapport de leurs applications; mais on a complétement négligé l'étude des corps poreux, et c'est celle qu'il importait d'aborder : car si on connaissait les lois de la capillarité dans les substances inorganiques pénétrables aux liquides et aux gaz, on pourrait immédiatement les appliquer aux tissus organisés, et l'on serait conduit à découvrir et à expliquer le rôle qu'elles jouent dans les actions vitales. C'est là le programme que je me suis proposé, et que je vais développer devant vous.

## PREMIÈRE PARTIE.

Dans l'étude que l'on fait en physique des phénomènes capillaires, on considère surtout le cas où un tube de verre très-étroit est plongé dans l'eau. On sait qu'alors le liquide monte dans le canal intérieur jusqu'à un niveau qui est plus élevé qu'à l'extérieur, et qui demeure invariable quand on soulève ou qu'on abaisse le tube. Il semble évident, au premier abord, que la longueur totale de la colonne liquide soulevée restera invariable si, au lieu d'être continue, elle est composée d'index successifs séparés par des bulles d'air; cependant il se présente alors des phénomènes extrêmement curieux, et tout à fait imprévus, que nous allons étudier.

Pour préparer aisément ces colonnes discontinues, je prends un tube capillaire, dont la longueur est égale à un mètre environ (fig. 1), et je le mets en communication par son extrémité $x$ avec une enceinte où le vide est fait; il est clair qu'un courant d'air rapide s'élance dans le tube de $y$ en $x$. On diminue convenablement sa vitesse au moyen d'un robinet placé en A, et qu'on ferme presque entièrement. Si alors on appuie sur l'extrémité $y$ le doigt recouvert d'un linge mouillé et qu'on le relève vivement aussitôt après, on voit un index liquide s'engager dans le canal de $y$ en $x$ et le parcourir vivement. En répétant la même opération un grand nombre de fois à des intervalles très-rapprochés, c'est-à-dire en abaissant et en soulevant rapidement et régulièrement le doigt mouillé, on obtient un très-grand nombre d'index égaux en longueur, séparés par des bulles d'air identiques et qui figurent

les grains d'un chapelet. Je vais étudier maintenant les propriétés des appareils ainsi préparés, en citant comme exemples les nombres obtenus avec l'un d'eux dont la régularité était parfaite.

Ayant placé le tube horizontalement, j'exerçai en $x$ une pression progressivement croissante. Tant qu'elle fut inférieure à celle d'une colonne d'eau de 50 millimètres, elle ne produisit aucun effet; mais aussitôt que cette limite fut dépassée, on vit l'index n° 1 s'avancer et comprimer la première bulle d'air qui diminua de longueur. Ce mouvement se communiqua à l'index n° 2 au moment où la pression devint égale à 100 millimètres, c'est-à-dire à deux fois 50 millimètres; et en continuant à la faire croître jusqu'aux valeurs $3 \times 50$ millimètres, $4 \times 50$ millimètres, $n \times 50$ millimètres, on vit le mouvement se transmettre jusqu'aux index dont les numéros d'ordre étaient 3, 4.... $n$.

Il faut évidemment conclure de là que chaque index oppose à la pression une résistance tout à fait comparable à celle qui résulte du frottement, et qui, dans l'exemple que nous citons, fait équilibre à la pression d'une colonne d'eau égale à 50 millimètres. De cette façon, l'un d'eux transmet au suivant la pression qu'il a reçue en la diminuant de 50 millimètres, et par conséquent, 2, 3, 4,... $n$, index, placés à la suite dans un tube, doivent opposer une résistance totale égale à $2 \times 50$ millimètres, $3 \times 50$ millimètres $n \times 50$ millimètres. Si le chapelet offre 200 grains, cette résistance sera égale à $200 \times 50$ millimètres, c'est-à-dire à une atmosphère, et l'on conçoit qu'elle pourra augmenter indéfiniment si le nombre des bulles croît lui-même indéfiniment.

Il m'a été facile de vérifier cette dernière conséquence en soudant à la suite l'un de l'autre plusieurs tubes

dans lesquels j'avais disposé des chapelets. Après en avoir réuni quatre, je pouvais exercer en $x$ une pression de trois atmosphères : alors je voyais les premiers index marcher vers $y$, et les premières bulles d'air diminuer considérablement de longueur; mais cet effet était de moins en moins sensible a mesure que l'on s'éloignait de $x$; la fin du chapelet demeurait entièrement immobile, et la pression exercée en $x$ ne se communiquait pas jusqu'en $y$.

On prévoit aisément, d'après ce qui précède, qu'une résistance analogue se présentera si on fait un vide partiel en $x$, et c'est en effet ce que l'expérience prouve. Tant que la diminution de pression en $x$ est inférieure à 50 millimètres, elle est sans effet; aussitôt qu'elle atteint cette limite, elle met en mouvement l'index n° 1, qui recule, et l'on voit s'agrandir la bulle suivante; mais le reste de la colonne demeure immobile. Il en faut conclure que l'index oppose au vide une résistance égale à 50 millimètres, et qu'il ne transmet une diminution de pression quelconque qu'après l'avoir diminuée de 50 millimètres; et puisque dans un chapelet l'effet des divers index s'ajoute nécessairement, il est clair que la résistance totale opposée à toute diminution de pression sera égale au produit de 50 millimètres par le nombre des index; s'il y en a 200, on pourra faire un vide complet en $x$, sans que son effet se fasse sentir en $y$.

C'est encore ce que l'expérience prouve. Lorsqu'on met l'extrémité $x$ en rapport avec une machine pneumatique, on voit les premières bulles augmenter beaucoup de longueur, et les dernières demeurer invariables. On conçoit néanmoins qu'on ne pourra parvenir à faire un vide complet, parce qu'alors la première bulle prendrait une longueur infinie, et qu'elle chasserait l'index n° 1 hors du tube.

J'ai raisonné jusqu'à présent sur un exemple particulier; mais il est bien évident que la résistance de chaque grain de chapelet doit varier avec diverses circonstances qu'il faut examiner. J'ai trouvé que pour un même tube elle est indépendante de la longueur des index, mais qu'elle augmente beaucoup quand les bulles d'air deviennent de plus en plus petites. C'est ce que montre le tableau suivant, qui résume des expériences faites avec un tube où l'élévation capillaire directe était de 145 millimètres.

| Nombre des bulles. | Longueur de chaque bulle. | Longueur de chaque index. | Résistance totale, *n* L. | L, résistance limite d'un grain de chapelet |
|---|---|---|---|---|
| | mm. | mm. | mm. | mm. |
| 1 | 91 | 61 | 0 | 0 |
| 1 | 21 | 6,4 | 5 | 5 |
| 1 | 2,8 | 90,2 | 25 | 25 |
| 10 | 1,6 | 33,5 | 289.8 | 28.9 |
| 10 | 0,9 | 11,4 | 343,9 | 34,4 |
| 15 | 0,5 | 1,5 | 540,0 | 36,0 |

La résistance limite de chaque grain paraît augmenter, toutes choses égales d'ailleurs, plus rapidement que le diamètre ne diminue. J'ai étudié trois tubes dans lesquels l'eau s'élevait par l'action de la capillarité à 35, 145 et 199 millimètres, dans lesquels j'avais disposé des chapelets dont les bulles offraient une longueur constante et égale à un millimètre environ. J'ai trouvé que les résistances limites étaient égales à 6, 35 et 54 millimètres. On reconnaîtra aisément que ces nombres croissent plus rapidement que les premiers.

Ces résultats ont été déterminés avec l'eau. Le mercure présente les mêmes effets et avec un degré d'énergie bien plus considérable ainsi qu'on le prouve par l'expérience suivante. On prolonge le sommet d'un baromètre AB par un tube capillaire AC (fig. 5); on remplit l'appareil avec du mercure en le plongeant jusqu'en C

dans une cuvette profonde; puis on le soulève peu à peu, et à mesure que le niveau tend à descendre dans le tube capillaire, on y fait entrer successivement de petites bulles de mercure. Quand il y en a sept ou huit, elles suffisent pour fermer le baromètre hermétiquemeut; on peut alors élever l'appareil de toute sa longueur et faire un vide complet dans l'intérieur comme si le tube était scellé en C. J'ajouterai que l'eau et le mercure paraissent être les substances qui produisent avec le plus d'énergie les phénomènes qui nous occupent ici.

En voyant ces actions singulières, on se demande naturellement quelle en peut être la cause. On pourrait se contenter de dire généralement qu'il y a un frottement exercé sur le tube par les grains du chapelet, et que pour vaincre la résistance opposée par chacun d'eux, il faut établir entre les deux extrémités une différence de pression égale ou supérieure à une limite donnée. Mais cette explication me paraît loin d'être suffisante : car puisque les résistances dont il est question n'existent pas avec l'air seul ou l'eau seule; puisqu'elles n'apparaissent que lorsque ces deux substances sont disposées en chapelets, et que d'ailleurs elles sont variables avec l'étendue des bulles d'air, il faut bien en chercher la cause dans quelque phénomène spécial qui se produirait à chaque surface de séparation. Voici à cet égard ce qu'il me paraît le plus rationnel d'admettre, tout en avouant que l'explication qui va suivre est entièrement conjecturale.

Soit en AB (fig. 2) un index liquide terminé à ses deux extrémités par deux surfaces concaves et symétriques l'une de l'autre, A *a* A, B *b* B. Quand nous exercerons une pression à la partie antérieure *a*, il paraît naturel d'admettre que la surface se creusera depuis *a* jusqu'en *a'* et que, par contre, l'autre extrémité *b*, éprou-

vant un effet inverse, marchera de $b$ en $b'$ : par conséquent, les deux bouts de l'index cesseront d'être symétriques ; A $a'$ A deviendra plus concave, et B $b'$ B le sera moins. Or, on sait, d'après la théorie de la capillarité, que la surface terminale d'un liquide exerce sur lui une pression capillaire, laquelle est d'autant plus grande que cette surface est moins concave. D'où il résulte que le changement de forme que nous venons de signaler fera naître une pression plus grande en $b'$ qu'en $a'$, et, par suite, une *résistance* à la compression extérieure qu'on a exercée en $a'$.

A mesure que cette compression augmentera, les différences de forme des deux surfaces s'accuseront davantage, ainsi que la résistance opposée par l'index; mais il est clair qu'elles ne pourront dépasser une certaine limite stable, et qu'alors la résistance atteindra elle-même un maximum qui était égal à une pression de 50 millimètres d'eau dans l'exemple cité plus haut.

La même explication s'applique avec le même degré de probabilité au cas du mercure. Considérons, en effet, un index à bouts symétriques A $a$ A, B $b$ B (fig. 3). Toute pression exercée en $a$ diminuera la convexité de l'extrémité antérieure, augmentera celle de la surface postérieure, et l'index sera représenté par les lignes ponctuées A $a'$ A, B $b'$ B. Or, la pression capillaire est d'autant plus considérable, que la convexité est plus prononcée; dès lors elle sera plus grande en $b'$ qu'en $a'$, et la différence des deux actions sera la résistance que l'index oppose à la compression extérieure.

Pour confirmer cette explication, il faudrait des expériences démontrant qu'en réalité la forme des index et des bulles devient dissymétrique et se maintient telle quand on soumet leurs extrémités à des pressions différentes; mais ces expériences ne me paraissent

guère pouvoir être précises. Au reste, je ferai remarquer que les faits qui nous occupent sont tout à fait indépendants de l'explication que j'en viens de donner, aussi bien que les conséquences que j'en vais tirer.

Je suppose qu'on place verticalement un tube de verre contenant un chapelet régulier (fig. 4), je vais examiner à quelles conditions les grains de ce chapelet pourront monter ou descendre ou se tenir en équilibre, en supposant comme précédemment que la résistance limite de chacun d'eux soit égale à 50 millimètres.

Considérons le premier index *a* : il est pesant et il exerce une pression égale à sa longueur *l*; d'où il résulte qu'il est dans le même cas que si on avait diminué la pression au-dessous de lui de cette qualité *l*; alors il devient plus concave à son sommet qu'à sa base, et il oppose en sens inverse de la pesanteur, c'est-à-dire de bas en haut, une résistance qui peut croître jusqu'à devenir égale à 50 millimètres. Or, comme le même effet se reproduira sur chaque index, on voit que le chapelet opposera une résistance totale, et que celle-ci pourra atteindre une valeur maximum égale au produit de 50 millimètres par le nombre des grains du chapelet.

Cela posé, il peut arriver trois cas, suivant que la longueur des index est supérieure, égale ou inférieure à 50 millimètres.

Dans le premier, chaque index produit de haut en bas une traction égale à sa longueur, et de bas en haut une résistance limite qui est moindre, il doit donc se mettre en mouvement, et le même effet se répétant pour chaque grain du chapelet, la colonne tout entière descend spontanément et lentement; pour la tenir en équilibre, il faudrait lui opposer de bas en haut une pression suffisamment grande.

Si chaque index est égal à 50 millimètres, il y a égalité

parfaite entre la pression qu'il exerce et la résistance limite qu'il oppose, l'équilibre est donc établi dans chaque grain du chapelet; mais pour peu qu'on fasse naître une différence de pression entre le sommet et la base, elle se transmet intégralement dans toute la colonne qu'elle fait descendre.

Enfin, lorsque la longueur de chaque index sera plus petite que 50 millimètres, les ménisques opposés prendront encore des différences de courbure, mais moins prononcées que précédemment, et seulement suffisantes pour faire naître une poussée capillaire agissant du bas vers le haut, et égale à la pression de l'index; après cela la colonne sera en équilibre en chacun de ses éléments. Mais si on veut la faire descendre par l'effet d'une différence de pression agissant de haut en bas, il faudra d'abord que chaque index prenne sa dissymétrie maxima, que chaque grain oppose une résistance individuelle égale à 50 millimètres et que la différence de pression augmentée de la traction exercée par le liquide soit égale ou supérieure à la résistance limite totale du chapelet. C'est ce que l'on voit très aisément en mettant un tube à chapelet AC au sommet d'un baromètre large AB (fig. 5), qui est plongé dans une cuvette profonde. Un robinet à trois branches A établit la communication entre les deux tubes. On chasse d'abord l'air de l'appareil par le conduit *a* en enfonçant le tout dans le mercure; ensuite on ferme la branche *a*, on établit la communication entre C et A, et on soulève l'appareil. On voit alors que deux cents bulles environ suffisent pour soutenir et maintenir dans AB une colonne de mercure égale à 700 millimètres, sans que le sommet du chapelet se mette en mouvement.

Dans les deux derniers cas, la colonne liquide se soutient d'elle-même sous l'influence des actions ca-

pillaires; et comme la résistance limite opposée par chaque grain augmente quand la longueur des bulles diminue, on voit qu'on pourra, dans un tube fin quelconque, soutenir une colonne liquide qui le remplira depuis le bas jusqu'en haut, qui n'offrira que des interruptions d'air très-petites, et qui, par conséquent, remplira presque toute la capacité du canal. A ce premier tube on pourra en superposer un second, puis un nombre quelconque, et l'on soutiendra ainsi une colonne d'eau indéfinie en hauteur. La moindre pression exercée au sommet la fera descendre, si la longueur de chaque index est égale à la résistance limite qu'il peut opposer; et si cette longueur était plus petite que cette résistance, il faudrait pour faire descendre la colonne exercer de haut en bas une poussée égale à la différence qui existe entre la somme des résistances limites et la pression de la colonne totale.

Mais il est facile de voir que si au lieu de faire descendre la colonne, on veut la faire mouvoir de bas en haut, on éprouvera une résistance énorme. Considérons le cas où la longueur de chaque index est égale à la résistance limite ou à 50 millimètres. Pendant qu'ils se soutiennent spontanément, ils ont au sommet leur concavité maxima; mais quand on vient à exercer une poussée de bas en haut, ils prennent des courbures inversement disposées. Alors la résistance change de signe, elle est dirigée de haut en bas, dans le même sens que les tractions exercées par tous ces index; et pour que la poussée inférieure mette la colonne en mouvement, il faut qu'elle soit égale à la somme de toutes les résistances augmentées de la traction exercée par la somme des index. Or, plus il y aura de grains au chapelet, plus la résistance totale augmentera, et plus il sera difficile de soulever la colonne.

Avant d'aller plus loin, nous pouvons tirer de ces faits

une conséquence capitale. On sait qu'il y a dans les végétaux des canaux larges souvent remplis d'air, et des tissus très-serrés, auxquels on attribue, avec raison, la fonction d'élever la séve. S'il y avait dans ceux-ci un mélange d'air et d'eau, de manière à former des chapelets, ils opposeraient une telle résistance à l'ascension du liquide, qu'aucune force ne pourrait y suffire. Il faut donc absolument que ces conduits soient exclusivement remplis de liquide. Si par une évaporation trop prolongée ils venaient à se dessécher partiellement, ils deviendraient absolument incapables de transmettre la séve, et la vie végétale s'éteindrait. C'est pour la même raison qu'il est possible d'injecter du sulfate de cuivre dans les troncs d'arbres récemment coupés, et que cette opération cesse d'être praticable quand ces troncs sont partiellement desséchés, et qu'il y a des interruptions successives d'air et d'eau dans le tissu ligneux.

On peut préparer ces chapelets d'une manière beaucoup plus simple, et augmenter considérablement la résistance qu'ils opposent à la pression.

Prenons un tube de verre dont les parois soient assez épaisses et dont le canal intérieur ait deux ou trois millimètres de diamètre; puis, chauffons-le dans la lampe d'émailleur, au point A (fig. 6), jusqu'à le ramollir. Nous diminuerons ainsi la dimension du conduit, et nous nous arrêterons lorsqu'elle sera devenue extrêmement petite. Nous répéterons ensuite la même opération en B, puis en C et ainsi de suite, de manière à obtenir des chambres successives réunies par des étranglements capillaires. Cela fait, nous remplirons ce tube avec de l'eau, par aspiration, et nous la chasserons ensuite par une pression exercée à l'un des bouts. Il en restera une certaine quantité qui demeurera adhérente aux parois, et qui se réunissant bientôt

à chaque étranglement y formera d'elle-même des index persistants; alors il y aura un chapelet dans le tube, et voici ce qui arrivera si on y exerce une pression par un bout dans le sens indiqué par la flèche M (fig. 7).

Le premier index AB, qui d'abord avait ses deux extrémités symétriques, s'avancera vers N, sa limite antérieure B atteindra une partie du tube plus large et y prendra une concavité moindre, tandis que la surface postérieure A, arrivant à la partie étranglée *a*, offrira un rayon de courbure fort petit. A ce moment l'index tout entier éprouvera de *b* vers *a* une poussée capillaire et opposera à la pression une résistance d'autant plus grande que l'étranglement sera plus prononcé. Il est probable que cet effet n'est pas le seul, et qu'il s'y ajoute encore une autre résistance provenant de la même cause que celle qui agit isolément dans les tubes cylindriques. Par conséquent, tant que la compression produite en M n'atteindra pas une limite de grandeur déterminée, elle n'aura d'autre effet que de faire reculer l'index et de développer une résistance égale à elle-même; mais quand elle aura dépassé la valeur pour laquelle le sommet *a* arrive à l'étranglement maximum, elle crèvera le liquide *ab*, se transmettra dans la chambre N, et agira sur le deuxième index CD.

Mais après avoir été crevé; l'index AB se reproduit instantanément comme une soupape qui se soulèverait pour se refermer ensuite. Il y a alors deux résistances opposées à la pression, l'une au premier étranglement AB, l'autre au second CD. En continuant ce même raisonnement, on voit qu'on pourra exercer en M un excès de pression très-grand qui se communiquera de chambre en chambre, mais en diminuant de l'une à la suivante, jusqu'à une dernière où il sera nul.

L'énergie de la résistance limite opposée dans chaque

étranglement dépend évidemment de la petitesse du canal qu'on y a laissé; mais elle est toujours extrêmement grande. Dans un tube où j'avais disposé douze chambres, ces index faisaient équilibre à une atmosphère. Trois autres étranglements qui étaient, à la vérité, exceptionnellement fins, et qui avaient été bouchés avec des index de mercure, suffisaient pour fermer hermétiquement un baromètre au sommet duquel on les avait placés.

Ces premières expériences vont nous conduire à une conséquence extrêmement importante. ABC (fig. 8) est un syphon dont l'une des branches AB est étranglée de place en place, tandis que l'autre BC est cylindrique. On amorce l'appareil en versant en BC de l'eau qui prend le même niveau dans les deux tubes. Lorsqu'elle est arrivée au sommet on la fait descendre de A vers N par une pression qu'on augmente peu à peu. A mesure que le liquide dépasse un étranglement, il y dépose un index qui exerce sa résistance propre, et le nombre de ces index augmentant, la résistance totale croît de plus en plus; finalement, l'excès de pression développé en A peut devenir supérieur à une atmosphère, sans que le niveau soit descendu jusqu'en B. On voit donc que le tube à étranglements, quand il a été primitivement rempli d'eau, n'est pas perméable, ou n'est que très-difficilement pénétré par le gaz qu'on essaye d'y faire entrer par pression.

Lorsque le niveau est en N et qu'il y a des index à chaque partie étranglée, supprimons la pression qui agissait en A. L'eau tend alors à remonter, elle afflue dans la première chambre n° 1, et l'index $\alpha$ se soulève. Si la pression de cette eau est plus grande que la résistance de cet index, elle finit par l'atteindre, par se mêler à lui, et par détruire sa résistance en le détruisant lui-même. Elle agit de même sur le suivant B; et comme à

mesure qu'elle monte elle fait disparaître les index successifs et que la résistance totale diminue à chaque fois, il est clair qu'elle finit par arriver en M. On voit que le tube AB est aisément pénétré par l'eau.

C'est une expérience extrêmement singulière que celle qui montre comment une pression exercée par l'air, en A, et qui dépasse une atmosphère ne suffit pas pour faire baisser l'eau jusqu'en B, tandis qu'on voit ce liquide remonter jusqu'à son niveau M aussitôt que l'on cesse de comprimer l'air en A. Cela peut se résumer par cette loi qui va de suite trouver son application : « Les tubes à étranglements, qui contiennent des index liquides assez nombreux, ne sont pas pénétrables par les gaz qu'on y chasse par pression ; mais ils se remplissent par les liquides avec la plus grande facilité. »

## DEUXIÈME PARTIE.

J'aborde maintenant l'étude de la capillarité dans les masses poreuses telles que la craie, le plâtre, les argiles cuites, les pierres en général, les poudres tassées, etc.

Les propriétés de ces substances peuvent se résumer par quatre expériences fondamentales que je vais décrire.

I. Je prends d'abord un bloc de craie A (fig. 9) dont la forme est quelconque et dont le volume est égal à un litre environ. Après l'avoir bien desséché j'y creuse un trou cylindrique vertical, pénétrant jusqu'au centre O, et j'y plonge un tube à conduit étroit OBCD que je scelle sur la craie avec du mastic de fontainier. Ce tube est recourbé en S ; il y a du mercure en BCB', et l'espace B'D, qui est fermé et divisé, contient de l'air à la pres-

sion atmosphérique ; c'est un véritable manomètre. Il est clair que si un excès de pression venait à se développer à l'intérieur du bloc, en O, il ferait monter le mercure en B', et on mesurerait ces excès par la diminution de longueur de la colonne d'air B'D. Cela étant compris, plongeons la masse de craie dans un vase plein d'eau.

On prévoit que le liquide va pénétrer dans la craie par capillarité, qu'il chassera l'air devant lui, que celui-ci, s'accumulant en OB, comprimera le mercure et que la pression finale indiquée par le manomètre sera égale à la force d'imbibition du liquide. Or on trouve, ce qui ne laisse pas que d'être fort étonnant, que cette pression s'elève progressivement jusqu'à trois ou quatre atmosphères.

La plupart des corps poreux, homogènes, et à pores suffisamment étroits, donnent les mêmes résultats avec des intensités variables : la pression s'est élevée jusqu'à trois atmosphères dans une bille de billard et jusqu'à cinq avec un bloc de pierre lithographique ; mais le marbre n'a rien produit.

Lorsqu'on veut opérer avec des substances pulvérulentes, on les tasse dans un vase poreux de pile AA (fig. 10) au moyen d'un mandrin et à coups de maillet ; on dispose le manomètre OBB'D dans leur intérieur comme on l'a fait précédemment pour la craie, et l'on ferme l'ouverture du vase avec un bouchon de bois EE que l'on mastique avec le plus grand soin. L'expérience se fait comme avec les corps solides, en plongeant tout l'appareil dans l'eau, et le manomètre monte de la même manière, jusqu'à trois atmosphères et demie environ avec de la terre ou du blanc d'Espagne, et jusqu'à cinq avec l'oxyde de zinc. L'amidon a produit rapidement une pression égale à six atmosphères, et qui continuait encore à s'élever lorsque, la nuit sur-

venant, j'ai quitté le laboratoire. Elle a dû s'accroître considérablement ensuite, car au matin suivant j'ai trouvé le vase brisé, ses éclats et la poudre projetés au loin et la plupart des objets voisins renversés. Le danger de recommencer cette expérience était trop évident pour que j'aie été tenté de le faire.

Il y a des substances avec lesquelles ces effets ne se manifestent pas : ce sont d'abord la plupart des pierres. Cela tient à ce qu'elles sont loin d'être homogènes et qu'elles offrent à côté de canaux extrêmement étroits des conduits souvent fort larges. Si donc l'eau pénètre par les premiers pour en chasser l'air et augmenter la pression intérieure, l'air comprimé, à son tour, s'échappe par les derniers dans lesquels la force capillaire est faible. On peut constater, en effet, des fuites de gaz qui se font toujours par les mêmes points de la surface : ce sont ceux où viennent aboutir les canaux larges. Les bois sont dans le même cas que les pierres, car leur tissu se compose de fibres serrées et de vaisseaux peu capillaires qui laissent échapper les gaz intérieurs quand on mouille la masse. D'ailleurs, en général, ils sont imparfaitement desséchés et ils contiennent des index liquides aux étranglements les plus étroits de leurs canaux intérieurs, de sorte qu'il y a dans toutes les directions des chapelets qui opposent une résistance énorme à l'imbibition qui est très-lente.

En tenant compte de ces circonstances perturbatrices, on explique les exceptions et on peut conclure que les corps poreux sont en général pénétrés par l'eau; elle s'y précipite avec une force énorme, qui refoule l'air de l'extérieur à l'intérieur, et qui est équilibrée quand la pression de ce gaz oppose une résistance égale. Cette force peut donc être mesurée par cette pression, et l'expérience vient de prouver qu'elle

est égale à plusieurs atmosphères. Nous la désignerons généralement par A.

Dans les exemples que nous avons cités, la pression du gaz intérieur a été comprise entre trois et six atmosphères; mais un peu de réflexion va nous montrer que la limite n'a pu être atteinte. En effet, l'imbibition se fait lentement, et d'autant plus que les pores sont plus étroits : car l'eau éprouve, comme on le sait, une grande difficulté à circuler dans les conduits très-fins. Avec la pierre lithographique la pression continue à croître pendant plus d'un mois, et sans qu'on puisse arriver à un état stationnaire. En second lieu, comme les corps poreux ne sont jamais absolument homogènes, on voit toujours une portion du gaz s'échapper par les fissures les plus larges. Enfin, comme le liquide s'élance à la fois dans toutes les directions, il emprisonne des bulles d'air et forme des chapelets qui opposent ensuite une résistance considérable à la pénétration ultérieure. On peut penser également qu'à ces pressions élevées et dans ces espaces très-petits une portion de l'air se dissout. D'autre part, l'expérience elle-même n'est pas disposée pour obtenir une mesure exacte de A, car la pression cessera de croître lorsque toute la masse sera imbibée et que l'air qu'elle contenait aura été relégué dans la cavité O et dans la partie OB du manomètre; elle sera donc d'autant plus élevée que la cavité et le tube auront moins de capacité. Tout cela nous montre que la force de pénétration A doit être supérieure à la pression mesurée dans nos expériences, c'est-à-dire plus grande que trois, cinq ou six atmosphères, pour la craie, le calcaire lithographique et l'amidon tassé.

Voici maintenant une conséquence évidente de ces expériences. Une atmosphère équivaut à la pression de 10 mètres d'eau, et cinq atmosphères représentent

une colonne de 50 mètres. Si donc on plongeait dans un réservoir plein d'eau un cylindre vertical de 50 mètres en pierre lithographique primitivement imbibé dans toutes ses parties, on verrait le liquide se maintenir dans les canaux intérieurs sans descendre, puisque la force qui tend à le faire monter est supérieure à la pression exercée par 50 mètres d'eau; et si par un procédé quelconque on pouvait continuellement enlever l'eau qui mouille la partie supérieure du cylindre, elle serait continuellement remplacée par celle que fournirait le réservoir du bas.

Il semblerait, d'après cela, que si le cylindre dont nous venons de parler était sec, et qu'il fût plongé dans un vase plein d'eau, elle devrait s'élever jusqu'au sommet : il n'en est rien, car les chapelets qui ne manquent pas de se former arrêtent bientôt les colonnes liquides dans leur ascension. L'expérience a été faite par Hales, avec des tubes remplis de poudre tassée, et l'ascension a toujours été très-faible. C'est pour la même raison que l'eau ne s'élève pas dans un arbre mort et desséché, tandis qu'elle se soutient à toute hauteur dans les végétaux vivants absolument imbibés, et qu'elle y est remplacée à mesure que l'évaporation la fait disparaître.

II. Nous allons faire maintenant une expérience inverse des précédentes. Reprenons une masse poreuse AA (fig. 11), dont le volume soit aussi considérable que possible, dans laquelle nous creuserons un trou large O et où nous mastiquerons une allonge B assez vaste pour contenir toute l'eau nécessaire à l'imbibition de la masse poreuse. Cette allonge, fermée au sommet, recevra deux tubes, l'un DE, terminé par un robinet E et un entonnoir F, l'autre $c\ c'\ c''$ affleurant au bouchon en $c$ et descendant verticalement dans une cuvette $c''$ pleine de mercure. Par excès de précaution

nous envelopperons le corps poreux d'une cloche MM placée dans une assiette pleine d'eau, afin d'empêcher l'évaporation du liquide dont le corps poreux va s'imbiber. Cela fait, nous verserons de l'eau par l'entonnoir F, elle pénétrera dans l'allonge, chassera l'air devant elle par le tube $c\,c'\,c''$ et nous fermerons le robinet quand tout l'appareil sera plein de liquide.

Il est évident que ce liquide devra pénétrer rapidement dans la masse poreuse en chassant l'air de l'intérieur à l'extérieur, que la pression diminuera progressivement en B, et que le mercure montera de $c''$ vers $c'$. Comme la force d'imbibition que nous avons représentée par A est supérieure à une atmosphère, l'élévation du mercure devra peu à peu devenir égale à la hauteur barométrique H; après quoi l'eau continuera de pénétrer avec une force A—H, qui sera encore positive; un espace vide se formera au sommet de l'allonge et il augmentera progressivement jusqu'au moment où tous les pores seront remplis.

Pour que ces prévisions de la théorie puissent se réaliser, il faut évidemment que le tube $c'\,c''$ soit étroit et le corps poreux volumineux, car sans cette double condition le liquide contenu danc $c'\,c''$ suffirait pour remplir entièrement les canaux jusqu'à la surface extérieure, et l'imbibition étant une fois complétée, l'eau cesserait de pénétrer dans la masse et le mercure de monter dans $c''\,c'$. Il faut encore que la capacité B soit suffisamment grande, car si l'eau qu'elle contient disparaissait complétement avant que la masse A fût saturée, l'air pourrait rentrer de l'extérieur à l'intérieur et le mercure baisserait rapidement.

J'ai fait l'expérience avec un parallélipipède de calcaire lithographique dont les trois dimensions étaient égales à 200, 130 et 45 millimètres, et le mercure s'est élevé de 720 millimètres en $c''\,c'$. Un espace vide

s'est formé au-dessus de l'eau en B; il a augmenté peu à peu durant plusieurs jours, après quoi tout est resté stationnaire pendant plus d'un mois. Quelques bulles d'air très-petites montaient cependant de temps en temps dans l'allonge; elles provenaient du gaz dissous dans l'eau ou de celui qui n'avait pas été expulsé de la masse poreuse. C'est à cause de cette circonstance et aussi à cause de la pression de la vapeur d'eau que la hauteur du mercure soulevé n'était pas rigoureusement égale à celle qui se maintient dans un baromètre. Cette expérience, aussi bien que les précédentes, prouve incontestablement que la force de pénétration de l'eau est supérieure à une atmosphère.

III. Dans tout ce qui précède nous avons supposé que les corps poreux étaient primitivement secs. Examinons maintenant leurs propriétés quand ils ont été préalablement imbibés d'eau.

Soit une cloison poreuse AA' BB' (fig. 12), établissant une séparation entre une couche d'eau N et l'atmosphère située en M. La moindre pression exercée sur l'eau N la fera évidemment couler à travers la cloison comme à travers une série de conduits capillaires. Cette cloison est donc perméable aux liquides. Il en est autrement si on exerce la pression sur la paroi opposée, de M vers N : l'eau tendra à abandonner la face AA' en reculant dans les pores et la cloison à se sécher. Mais puisque la force de pénétration A de cette eau est supérieure à trois atmosphères en général, il faudra que la pression exercée en M soit au moins égale à cette force pour que le gaz puisse traverser la cloison.

Non-seulement il faut que la pression du gaz soit au moins égale à A, il faudra encore qu'elle soit beaucoup plus grande; car les conduits capillaires qui

traversent la masse sont évidemment irréguliers et doivent présenter dans toutes les directions des dilatations et des étranglements successifs comme dans la figure 8; et si l'air comprimé en AA' venait à s'y engager, il se formerait à chaque section contractée des index liquides dont la résistance augmenterait avec leur nombre et qui s'opposeraient au mouvement de pénétration du gaz. Nous pouvons donc conclure que « les cloisons poreuses mouillées ne sont perméables aux gaz que lorsque ceux-ci sont poussés par une force bien notablement supérieure à A. »

Il suit de là qu'on pourra faire en N un vide absolu sans que l'air qui est en contact avec la face AA pénètre dans la cloison, puisque le vide équivaudra à la pression d'une atmosphère que l'on exercerait en M, et qui serait inférieure à A. C'est en effet ce qui est confirmé par la deuxième expérience, décrite page 20 et représentée figure 11; car par suite de l'imbibition du corps poreux A, le vide se fait dans l'allonge B et il se maintient indéfiniment sans que l'air enfermé sous la cloche MM puisse pénétrer dans les pores.

Cette imperméabilité des parois poreuses mouillées aux gaz comprimés, peut se constater par des expériences fort nombreuses. Prenons un petit vase de pile bien sec A (fig. 13), sur lequel nous mastiquerons un bouchon C et un long tube CD. Si par une pompe foulante nous exerçons une pression à l'intérieur, nous déterminons un courant d'air assez rapide à travers la cloison tant qu'elle est sèche; mais quand on vient à plonger le vase dans l'eau, il se mouille à l'instant, le courant d'air s'arrête aussitôt, la pression intérieure devient et demeure constante, et elle peut être indéfiniment maintenue à plus de trois atmosphères, absolument comme si la paroi était subitement devenue imperméable.

Si, laissant le même appareil dans l'eau, on fait le vide par le tube D, le liquide pénètre dans la cavité A et monte rapidement jusqu'en D. Ou bien, si on abandonne l'appareil dans l'air après l'avoir rempli jusqu'à son sommet avec de l'eau, elle exerce sur les parois intérieures de A une pression suffisante pour filtrer abondamment. Cela prouve la parfaite pénétrabilité de la cloison pour les liquides. Mais si on retourne l'appareil dans un bain d'eau (fig. 14), la pression en A devient moindre qu'à l'extérieur; on voit aussitôt la surface du vase poreux se sécher, parce que l'eau qui la mouillait rentre dans la masse; mais on ne voit pas l'air traverser la cloison. On peut encore verser un mélange de mercure et d'eau dans l'appareil que l'on retourne ensuite dans une cuvette de baromètre; alors le mercure se rassemble en ED, la pression en A est égale à celle de l'atmosphère diminuée de ED, elle peut être nulle si on a mis assez de mercure, et cependant l'air extérieur ne pénètre pas dans le vase A.

On peut faire les mêmes opérations avec un tube AB rempli de plâtre qu'on y a coulé directement et qui n'a pas été séché au contact de l'air. Quand on plonge l'extrémité D dans l'eau et qu'on fait le vide au sommet par un tube C, on voit le liquide monter en BC. Si on laisse l'extrémité D dans l'air, tout mouvement s'arrête et le vide se maintient indéfiniment. Il en est de même quand on exerce une pression en D et même quand, à la fois, on comprime de l'air en DA et qu'on fait le vide en C.

Pour que ces expériences réussissent complétement il est nécessaire de choisir avec soin les vases poreux et de s'assurer à l'avance qu'ils ne sont pas percés en quelques-uns de leurs points par des canaux trop larges qui offriraient aux gaz une issue toujours ouverte.

Quand on a reconnu l'existence de ces fissures il est toujours facile de les boucher avec un peu de vernis à la gomme laque qu'on applique sur les parties défectueuses après les avoir bien séchées.

IV. Il me reste à parler d'une quatrième expérience qui est connue depuis longtemps, mais qui n'a pas encore été complétement expliquée et qui, n'ayant jamais été faite avec les soins qu'elle exige, a toujours donné des résultats moins énergiques que ceux auxquels je suis parvenu.

M. Magnus prit un tube droit de verre, fermé à l'une de ses extrémités par une peau de vessie tendue AB (fig 16) : il le remplit d'eau, puis après avoir appliqué le doigt sur le bout CD resté ouvert, il retourna l'appareil dans un bain de mercure, comme on le fait dans l'expérience de Torricelli, et il l'abandonna à lui-même pendant plusieurs jours. L'eau s'évapora peu à peu à travers la vessie, et M. Magnus vit le mercure monter progressivement jusqu'à trois pouces, après quoi, l'air commença à entrer et le niveau baissa rapidement.

M. Magnus n'a donné de ce phénomène qu'une explication incomplète; celle qui me paraît évidente est la suivante : 1° l'eau pénètre, en vertu de la force d'imbibition que nous avons représentée par A, dans les pores de la membrane et elle affleure à la surface extérieure où elle est en contact avec l'air; 2° elle s'évapore à cette surface qui tend à se dessécher; mais la force d'imbibition y ramène le liquide à mesure qu'il disparaît; par conséquent il se fait un vide progressif dans le tube et le mercure monte d'une hauteur H; 3° l'air extérieur ne peut entrer à travers la cloison poreuse humide, puisque d'après les expériences précédentes elle est impénétrable aux gaz.

Deux conséquences résultent de cette explication. La première, c'est que l'expérience doit réussir avec tous

les corps poreux; la deuxième est la suivante : puisque la force de pénétration est égale à A, et que l'élévation du mercure est H, le liquide est chassé dans les pores avec une poussée égale à A — H, qui diminue à mesure que H augmente, mais qui reste toujours positive, lors même que H est égale à la hauteur barométrique, puisque A est supérieure à une atmosphère. Donc le mercure ne doit pas seulement monter de trois pouces comme dans l'expérience de M. Magnus, il doit s'élever de 760 millimètres.

Pour vérifier expérimentalement cette conséquence avec tous les corps poreux précédemment étudiés, il faut prendre quelques précautions. Voici comment j'opère (fig. 17). Je prends un vase poreux de pile A ou un alcarazas ou des blocs de pierres bien homogènes, telles que le calcaire lithographique et la craie, dans lesquels on a creusé une cavité. Je scelle à l'ouverture une grande allonge en verre dans laquelle pénètre un tube DC qui est terminé en D par un robinet et surmonté d'un entonnoir. Un autre tube FGH part du sommet F de l'allonge, il se recourbe deux fois et vient plonger dans une cuvette H au milieu d'un bain de mercure. Ensuite je remplis l'appareil avec de l'eau versée par l'entonnoir et qui chasse tout l'air devant elle par le tube H. Quand tout est rigoureusement plein, je ferme le robinet D et j'abandonne l'appareil à lui-même. Bientôt l'évaporation se fait à la surface extérieure de A et l'on voit peu à peu le mercure monter dans le tube GH et indiquer le degré de vide qui se produit au dedans. A mesure que ce vide augmente, des bulles d'air s'élèvent dans l'allonge; elles proviennent du gaz dissous par l'eau ou emprisonné dans les pores, et l'on conçoit que leur dégagement empêche le vide de se faire complétement. Peu à peu elles deviennent plus rares, et au bout de quelques

jours elles ont très-sensiblement disparu. Alors on verse dans l'entonnoir de l'eau bien purgée d'air par l'ébullition et, en ouvrant le robinet, on la fait pénétrer dans l'appareil d'où elle chasse l'air rentré. On laisse de nouveau l'évaporation se produire et on voit le mercure monter plus rapidement et plus haut que précédemment. En répétant la même manipulation plusieurs fois, on arrive, au bout d'un mois environ, à avoir chassé tout l'air, et alors l'ascension du mercure atteint 745 millimètres à une température de 15°, limite qui ne peut être dépassée, car la force élastique de la vapeur d'eau est égale à 13 millimètres environ et doit faire baisser la colonne de 760 à 760—13 ou à 747.

On peut donc dire, conformément aux prévisions de la théorie, qu'il se fait un vide complet et qu'il ne rentre aucune trace d'air à l'intérieur. D'ailleurs, l'eau continue à s'évaporer, son niveau baisse indéfiniment, et tant qu'il en reste dans le vase A elle pénètre dans les pores, ce qui prouve d'une autre manière que la force d'imbibition A est supérieure à une atmosphère. Enfin, quand tout le liquide a disparu, le vase se sèche peu à peu, et tout à coup l'air rentre brusquement quand les conduits se sont vidés d'eau.

Telles sont les expériences fondamentales qui nous révèlent les propriétés des corps poreux. Je les résume en quelques mots :

1° L'eau pénètre dans un corps poreux sec avec une force qui atteint et dépasse cinq et même six atmosphères. Elle est vraisemblablement variable avec les substances employées : je la représente par A ;

2° Une paroi poreuse mouillée est traversée par les liquides sous l'influence des plus faibles pressions; elle n'est perméable aux gaz que s'ils sont chassés par une poussée supérieure à A ;

3° Quand un vase poreux est plein d'eau, elle s'évapore à la surface extérieure sans que l'air traverse la cloison, et il se fait au dedans un vide complet qui persiste tant que l'eau n'est pas entièrement évaporée et que la paroi n'est pas suffisamment séchée.

---

# DEUXIÈME LEÇON.

## TROISIÈME PARTIE.

MESSIEURS,

Il ne suffit pas d'avoir démontré, comme je l'ai fait dans la leçon précédente, que les liquides pénètrent dans les corps poreux secs avec une force égale à plusieurs atmosphères et que j'ai désignée par A; il faut encore essayer de donner la théorie mathématique de ces phénomènes, afin d'expliquer les expériences que j'ai décrites, et aussi afin de prévoir et de calculer les actions qui se produisent dans les phénomènes naturels. Or on arrive aisément à poser les bases de cette théorie en appliquant au cas des corps poreux les principes qui ont permis d'expliquer l'ascension de l'eau dans les tubes capillaires. Ce n'est pas ici le lieu de développer les calculs auxquels j'ai été conduit, et qui trouveront place dans un mémoire plus circonstancié; je me contenterai d'indiquer la marche que j'ai suivie et d'énoncer les résultats généraux auxquels elle m'a mené.

Je me représente théoriquement les corps poreux homogènes comme étant constitués par des groupes moléculaires solides, impénétrables et immobiles, jux-

taposés régulièrement, tenus à des distances moyennes égales dans toute direction, et laissant entre eux des espaces plus ou moins grands, égaux et pénétrables par les gaz ou par les liquides. A la vérité, cette régularité hypothétique ne sera jamais absolument réalisée; mais il est nécessaire quand on veut faire la théorie de phénomènes quelconques d'éliminer tout accident de structure qui les compliquerait inutilement.

1° Soit donc AA (fig. 18) l'un de ces corps poreux secs, indéfini dans tous les sens, excepté en hauteur, et supposons-le terminé par une surface horizontale XY plongeant dans l'eau BB. Considérons une molécule M de ce liquide, et décrivons du point qu'elle occupe, comme centre, une sphère de rayon égal à la distance de l'attraction sensible. Si cette sphère coupe la surface XY, M sera sollicitée par la différence des attractions exercées, d'une part par le solide *abc* et de l'autre par la portion symétrique de liquide $a'b'c'$. Cette action se produira sur toutes les molécules comprises entre la surface XY et la couche BB située à une distance de XY égale à celle de l'attraction sensible, et toutes ces attractions produiront le même effet qu'une pression qui pousserait le liquide dans les interstices du corps poreux et que nous désignerons par $p'$. Le calcul donne

$$p' = L\left(\alpha \frac{d}{D} - 1\right).$$

L est une constante qui ne dépend que du liquide, $d$ est la densité du corps poreux considéré, D celle qu'il aurait si tous les groupes moléculaires qui le composent étaient rapprochés l'un de l'autre jusqu'au contact, et $\alpha$ est le rapport spécifique qui existe entre les attractions exercées à la même distance par des volumes égaux du solide et du liquide. Il est évi-

dent dès lors que la pression $p'$ sera positive, nulle ou négative, suivant que $\frac{d}{D}$ sera supérieur, égal ou inférieur à $\frac{1}{\alpha}$. Par suite il y aura des corps poreux dans lesquels l'eau pénétrera avec une grande énergie, d'autres où elle se tiendra en équilibre au contact de la surface extérieure XY, d'autres enfin qui la repousseront et ne seront point mouillés par elle.

Ces différents modes d'action sont en effet constatés par des expériences journalières : il existe des schistes dits happants qui absorbent l'eau avec une énergie singulière, des pierres qui l'attirent moins promptement, des bois qui s'imbibent très-lentement, et enfin des substances parmi lesquelles on peut citer le duvet des oiseaux aquatiques, qui ne se mouillent jamais.

2° Admettons en second lieu que l'eau ait pénétré dans le corps poreux et en ait rempli tous les interstices, la molécule M sera attirée, de haut en bas, par le liquide $a'b'c'$, de bas en haut par le corps poreux $abc$ et par le liquide qui le remplit; la différence entre ces forces sera plus grande que dans le cas précédent. Si on répète le même raisonnement pour une seconde molécule liquide M', située dans les interstices du corps poreux et à la même distance de XY que M, on voit qu'elle éprouvera exactement la même action qui sera égale à la différence des attractions exercées par $a_1\, b_1\, c_1$ et $a_1'\, b_1'\, c_1'$. Il y a donc au-dessus et au-dessous de XY deux couches limitées à AA et à BB, dont l'épaisseur est égale à la distance limite de l'attraction, qui éprouvent des actions égales et qui font naître une pression $p''$ dirigée de bas en haut; $p''$ est exprimée par la formule suivante :

$$p'' = 2\,L\,\frac{d}{D}\,(\alpha - 1).$$

Cette force est positive, nulle ou négative, si le rapport $\alpha$ des attractions du solide et du liquide est supérieur, égal ou inférieur à l'unité.

3° Nous avons supposé que le liquide situé au-dessous de XY, en BB, avait une épaisseur indéfinie. Admettons maintenant qu'elle soit très-petite et limitée au plan $a' c' b_1'$, à une distance de XY moindre que le rayon de l'attraction sensible. En supprimant ainsi tout le liquide compris entre $a' b_1'$ et BB nous produisons deux effets inverses: 1° nous détruisons l'attraction exercée de bas en haut sur la couche $a' b_1'$ BB, ce qui diminue la pression moléculaire; 2° nous détruisons aussi l'attraction exercée de haut en bas par tout le liquide situé dans cette couche, ce qui augmente cette pression résultante. Celle-ci ne sera donc plus égale à $p''$ comme précédemment, et elle changera d'une manière continue à mesure que la couche terminale $a' b_1'$ se rapprochera de la surface XY. Quand elle se confondra avec XY, la pression sera devenue égale à $p'''$. Or on trouve

$$p''' = L\left\{1 + \frac{d}{D}(\alpha - 1)\right\}.$$

4° Enfin, il peut se faire que la couche terminale du liquide se recule dans l'intérieur du corps poreux d'une quantité progressive, jusqu'à se placer en AA au-dessus de XY, à une distance égale ou supérieure au rayon de l'attraction sensible. Le calcul prouve encore que la pression capillaire varie d'une manière continue depuis $p'''$ jusqu'à une dernière valeur $p''''$, et l'on a

$$p'''' = L\left(1 - \frac{d}{D}\right).$$

En résumé, la pression moléculaire qui chasse le liquide vers le corps poreux mouillé varie continuellement

depuis le moment où la surface de ce liquide est située à la distance d'attraction sensible au-dessous de XY, pendant qu'elle s'élève progressivement jusqu'à la même distance au-dessus. Elle est égale à $p''$ quand la couche terminale est comprise entre l'infini et BB, à $p'''$ quand le liquide affleure à XY, et à $p''''$ quand il est limité à AA ou au-dessus de AA.

Dans ce qui va suivre nous supposerons que $\alpha$ est plus grand que l'unité, c'est-à-dire que l'attraction du solide sur le liquide est plus grande que celle du liquide sur lui-même. Dans ce cas on voit de suite que $p''''$ est plus petit que $p'''$, ce qui veut dire, « que la pression moléculaire diminue à mesure que la surface liquide, d'abord confondue avec XY, se retire dans l'intérieur du corps poreux jusqu'à une distance égale ou supérieure à celle de l'attraction sensible. »

La pression $p''$ est nulle quand la densité $d$ du corps poreux est égale à zéro; mais $p''$ augmente avec $d$, et parmi tous les cas qui peuvent se présenter, nous signalerons les deux suivants :

1° Lorsque $d = \frac{1}{2\alpha - 1}$, $p''$ devient égal à $p''''$ et moindre que $p'''$, et dans ce cas « la pression moléculaire augmente quand la couche terminale du liquide se rapproche depuis BB jusqu'à se confondre avec XY, puis elle diminue quand le liquide se retire à l'intérieur jusqu'à AA. » On verra dans la suite que ces conditions paraissent réalisées dans quelques tissus ligneux.

2° Lorsque $d$ atteint et dépasse la valeur $\frac{1}{\alpha - 1}$, $p''$ atteint et dépasse $p'''$; dans ce cas « la pression est maximum et égale à $p''$ lorsque le liquide déborde le corps poreux et y forme une couche extérieure BBXY dont l'épaisseur est au moins égale à la limite de l'attraction; cette pression diminue et devient $p'''$ quand la

surface du liquide se rapproche du corps poreux et se confond avec XY; elle continue à décroître jusqu'à son minimum $p'''$ si le liquide rentre à l'intérieur jusqu'à AA. » Ce dernier cas s'applique à tous les corps poreux que nous avons étudiés précédemment : on va voir qu'il explique toutes nos expériences.

I. Il explique d'abord les phénomènes que nous avons observés en plongeant une masse poreuse séchée dans l'eau; car d'abord le liquide pénètre dans les interstices avec une force $p'$, et aussitôt qu'il y est entré jusqu'à une profondeur égale ou supérieure à la distance de l'attraction sensible, il y a deux pressions, l'une qui s'exerce de l'extérieur à l'intérieur et qui est égale à $p''$, l'autre opposée qui est moindre et égale à $p''''$; la différence $p''-p''''$ est positive, et le liquide continue à s'avancer en chassant devant lui l'air que les pores contenaient primitivement et dont la pression augmente progressivement. L'équilibre s'établit lorsque cette pression que nous avons désignée par A devient égale à $p''-p''''$.

II. Quand on considère une paroi poreuse AABB (fig. 19) primitivement imbibée et mouillée sur ses deux faces, il y a deux pressions égales à $p''$ sur AA et sur BB et elles se détruisent; mais si l'on exerce de l'un des côtés un excès de pression quelque petit qu'il soit, il fera filtrer l'eau. La paroi est donc pénétrable par les liquides.

III. Lorsqu'une des deux faces AA est en contact avec de l'eau et l'autre BB avec de l'air que l'on comprime peu à peu, on repousse la surface terminale du liquide jusqu'en CC à une profondeur progressivement croissante. Alors la pression capillaire est $p''$ en AA, elle se réduit à $p''''$ en CC, et l'air ne peut traverser la cloison que si sa force élastique est égale à $p''-p''''$, c'est-à-dire à A. On voit par conséquent que la paroi pé-

nétrable aux liquides ne le sera que très-difficilement aux gaz.

Une foule de phénomènes bien connus et dont l'explication n'avait point été donnée jusqu'à présent, deviennent évidents grâce à la théorie précédente : j'en étudierai quelques-uns. On sait que les substances hygrométriques se gonflent quand elles absorbent de l'eau, et qu'elles peuvent exercer par l'effet de cette expansion un effort tel qu'on l'utilise dans les carrières de pierre meulière pour diviser les blocs en tronçons réguliers. On les taille en cylindres et l'on dessine extérieurement les contours des assises *a c*, *a' c'* que l'on veut séparer (fig. 20). On y creuse des cavités, et l'on y enfonce à coups de masse des coins de bois sec sur lesquels on fait couler l'eau qui provient des infiltrations : ces coins se gonflent en se mouillant et le gonflement suffit pour séparer les assises.

Cette dilatation des bois et en général des substances hygrométriques ne se produit qu'à la longue quand on les maintient plongés dans l'eau, parce que ce liquide ne pénètre dans les pores que lentement. Cela tient à ce que l'air intérieur s'oppose à l'imbibition. J'ai eu l'occasion d'étudier une règle de platane qui avait, perpendiculairement aux fibres ligneuses, une largeur de 10cc. Je la fixai au fond d'un vase de verre sous la cloche d'une machine pneumatique, et par un vide suffisamment prolongé et très-complet, j'enlevai la presque totalité de l'air enfermé dans les pores. Ensuite j'injectai sur le bois une masse d'eau qui pénétra tout à coup dans la règle, et je trouvai que la largeur était devenue égale à 12cc : elle avait subitement augmenté de $\frac{1}{5}$. Il fallut laisser plus d'un mois dans l'eau un second échantillon de la même règle, que l'on n'avait point purgé d'air, pour qu'il éprouvât la même dilatation que le premier.

On a enfin remarqué que ce gonflement des substances hygrométriques se fait toujours perpendiculairement aux fibres, et c'est aussi dans ce sens que ces corps se dilatent le plus par l'effet de la traction. Voyons maintenant s'il est possible d'expliquer ces diverses circonstances.

Quand un morceau de bois complétement imbibé est plongé dans l'eau, il y a sur tous les éléments de sa surface extérieure une pression égale à $p''$, laquelle est beaucoup plus grande que A, puisque A est égal à $p'' - p''''$. Nous ne pouvons apprécier en aucune façon la valeur de $p''$; la seule chose que nous sachions, c'est qu'étant supérieure à A elle est nécessairement très-considérable.

Dès lors, le liquide prend à l'intérieur la pression $p''$, à l'extérieur celle de l'atmosphère, et les fibres imprégnées d'eau comprimée sont dans le même cas qu'une enveloppe remplie de gaz condensé; elles doivent se distendre, et l'équilibre aura lieu quand la résistance opposée par les fibres sera devenue égale à l'effort exercé par l'eau pour les écarter.

De là résultent deux conséquences : la première est que le gonflement sera nécessairement maximum dans le sens où la résistance à la traction est la moins grande, c'est-à-dire dans le sens perpendiculaire aux fibres, ce que l'expérience a démontré. La deuxième conséquence est qu'on pourrait mesurer l'effort exercé par l'eau contre les fibres, c'est-à-dire sa pression, par la traction qu'il faudrait faire agir sur le bois sec perpendiculairement à ses fibres pour produire le même gonflement. C'est une expérience sur laquelle je me propose de revenir.

Comme deuxième exemple des phénomènes naturels qu'on peut expliquer par la théorie précédente, je vais discuter les circonstances qui accompagnent la

dessiccation des corps poreux préalablement imbibés ou l'imbibition de ceux qui ont été desséchés.

Prenons une pierre bien homogène sortant de la carrière, par exemple un bloc de calcaire lithographique, ou de craie, ou de plâtre qu'on vient de gâcher, et avant qu'elle ait commencé à se dessécher, scellons dans une cavité intérieure A, au moyen de ciment romain, un tube deux fois recourbé et rempli d'eau (fig. 21); puis abandonnons l'appareil à lui-même. Au premier moment les pressions moléculaires, qui s'exercent contre les surfaces intérieure et extérieure mouillées, sont égales à $p''$; mais aussitôt que le liquide commencera à s'évaporer en BB, la surface qui le termine tendra à reculer à l'intérieur jusqu'en *bbb* et sa pression moléculaire à diminuer jusqu'à la valeur minimum $p''''$. L'équilibre sera détruit, l'eau contenue dans la cavité centrale sera absorbée et le vide se fera peu à peu en A. Quand il sera devenu complet, la pression capillaire intérieure sera devenue égale à $p''-760$, quantité plus grande que $p''''$, et le liquide continuera d'affluer vers BB, tant qu'il en restera en A.

Quand il a disparu les conditions changent : la couche terminale intérieure recule dans la masse jusqu'en *aaa* à une profondeur moindre que la distance de l'attraction limite et telle que la pression capillaire qui s'y exerce soit égale à $p''''$, qui existe en *bbb*, augmentée de la pression atmosphérique. Après cela la couche limite *aaa* reste invariable.

Mais l'eau continuera de s'évaporer extérieurement, et la couche limite *bbb* pénétrera à des profondeurs de plus en plus grandes jusqu'à ce qu'elle atteigne *aaa*, alors le corps sera entièrement dépouillé d'eau.

Voilà ce qui se passerait si le corps poreux était parfaitement homogène et régulier; mais comme cela n'est jamais réalisé, les irrégularités de la structure

vont modifier et compliquer comme il suit le phénomène de la dessiccation.

Il y a dans la masse des interstices très-larges, d'autres qui le sont moins et qui peuvent être classés par ordre de grandeur décroissante. Au moment où la dessiccation commencera les premiers se conduiront comme la cavité que nous avions creusée en A (fig. 21), c'est-à-dire que le liquide qu'ils contenaient sera absorbé et qu'il s'y formera un vide complet; mais comme ils sont séparés les uns des autres par des étranglements, il y aura dans toutes les directions des chapelets qui empêcheront l'air atmosphérique de pénétrer dans la masse. Ainsi, à un moment donné, toutes les cavités qui dépassent une certaine dimension seront vides, et toutes celles qui ne l'atteignent pas resteront remplies de liquide. Peu à peu l'évaporation continuant, l'eau abandonnera successivement les divers interstices par ordre de grandeur pour se réfugier dans les plus petits, le nombre des index restés dans les étranglements diminuera, et bientôt l'air pourra entrer de l'extérieur à l'intérieur dans les canaux les plus larges. A partir de ce moment la masse aura une certaine perméabilité aux gaz, et les manomètres disposés à l'intérieur comme celui de la figure 21 baisseront tout à coup. Enfin la dessiccation continuera de la même manière, et ce sont les interstices les plus étroits qui se videront les derniers.

On peut tirer de ces faits de très-nombreuses conséquences : on explique, par exemple, la grande difficulté qu'éprouvent à se sécher les pierres ou les plâtres, puisque l'eau se réfugie dans des canaux de plus en plus petits où l'évaporation devient de plus en plus difficile. On explique encore le retrait qu'éprouvent les pierres, les argiles, les plâtres, l'amidon, etc.; car, tant qu'elles sont humectées, ces substances sont di-

latées comme les bois mouillés, par la réaction de l'eau emprisonnée; et au moment où cette eau disparaît et que le vide se fait dans les cavités intérieures, l'action change de signe et les molécules se rapprochent. On comprend que cette contraction doit faire durcir les pierres, et l'effet s'augmente encore parce que l'eau de carrière qui est très-comprimée tient en dissolution une partie de la substance qui se concrète et sert de lien entre les molécules pendant la dessiccation.

Supposons maintenant que le corps poreux ait été primitivement desséché, et qu'on le plonge dans l'eau : elle y pénètre immédiatement, mais par les canaux les plus larges parce qu'elle y marche plus vite, et ceux-ci étant anastomosés dans la masse, il y aura bientôt des filets liquides entrecroisés dans tous les sens. De ces artères principales partent ensuite des ramifications nombreuses, et à mesure que le liquide marche ainsi des conduits les plus larges aux plus étroits, il refoule devant lui l'air qui se condense nécessairement dans les interstices les plus fins où il prend une pression de plus en plus grande. Quand cette pression devient égale à la force de pénétration, l'équilibre est établi.

On voit donc que le corps poreux ne se mouillera pas en totalité, que sa masse sera remplie en partie par du liquide et par tout le gaz qu'il contenait à l'état sec, et que ce gaz réfugié dans des cavités extrêmement petites atteindra une pression énorme. Par conséquent, toute pierre qui a une fois été séchée ne peut plus, en séjournant dans l'eau, revenir à l'état d'imbibition complète où elle était dans la carrière, ce que tout le monde sait, et aussitôt qu'on l'expose à l'air, elle se dessèche très-rapidement, car la pression de l'air intérieur ramène constamment à la surface l'eau qui s'y évapore continuellement.

On prévoit par là que de grandes variations de pres-

sion se produisent dans les pores des pierres exposées à l'influence des variations atmosphériques. Lorsqu'il pleut, les gaz sont refoulés à l'intérieur et leur élasticité augmente; lorsque le temps est beau, l'humidité disparaît en partie par la surface, et un vide plus ou moins complet se fait dans les interstices. C'est ce qu'il est très-facile de constater en scellant des manomètres dans un bloc de craie analogue à celui de la figure 21.

Nous devons nous demander si les gaz enfermés ainsi dans ces corps poreux partiellement imbibés n'ont point acquis des propriétés spéciales, et pour le savoir nous n'avons qu'à faire varier la pression ou la température, et à examiner comment ils se compriment ou se dilatent.

J'ai préparé une bouillie claire avec de l'oxyde de zinc et de l'eau, je l'ai introduite dans un ballon ABC (fig. 22), dont le col très-long avait une capacité au moins égale à celle du réservoir sphérique A, puis j'ai fait progressivement le vide par C. Bien que la bouillie ne contenait aucune quantité apparente d'air, elle se dilatait jusqu'à doubler de volume, par l'effet du vide, et aucune bulle de gaz ne se dégageait. Lorsqu'en ouvrant brusquement le robinet de la machine on rétablissait la pression atmosphérique en C, on voyait le niveau redescendre jusqu'en B, et avec une rapidité telle qu'il y avait sur le support du ballon un choc bruyant comparable à un fort coup de poing.

Cela prouve qu'il était resté dans l'oxyde de zinc une certaine quantité d'air emprisonné, susceptible de se dilater par la diminution de pression, mais incapable de vaincre l'adhérence qui le fixe au solide poreux. Pour bien préciser l'état de ce gaz, j'ai calculé son volume sous la pression atmosphérique, ce qu'il était facile de faire, connaissant la capacité du ballon, le

volume de l'eau introduite, ainsi que le poids et la densité du blanc de zinc. Puis, j'ai fait diminuer progressivement la pression en C, et j'ai mesuré les augmentations de volume correspondantes. En discutant les résultats, j'ai reconnu que le gaz ne suivait pas la loi de Mariotte, et qu'il se comportait absolument comme si, étant liquéfié à la pression atmosphérique, il se dégageait peu à peu à mesure que le vide se complétait.

On arrive à la même conclusion quand on chauffe l'appareil, qu'on mesure la dilatation de la masse totale, et qu'on en déduit celle du gaz. On trouve qu'elle est insensible de 0° à 10°, qu'elle est à peu près égale à celle des gaz ordinaires entre 10° et 15°, et qu'au delà elle augmente rapidement jusqu'à être 100 fois plus grande que celle de l'air entre 40° et 50°.

Tout cela montre qu'enfermés dans les pores des corps solides et comprimés par l'eau, les gaz arrivent à une pression qu'il n'est pas possible de calculer, mais qui est manifestement énorme, et qu'ils se comportent alors à peu près comme s'ils avaient été liquéfiés. Nous verrons dans la suite qu'il faut tenir compte de ces propriétés si on veut expliquer les phénomènes de la végétation dont je vais maintenant m'occuper.

## QUATRIÈME PARTIE.

Pour expliquer l'ascension de la séve dans les végétaux, on a eu recours à diverses hypothèses. Quelques physiologistes se sont contentés de l'attribuer à la force vitale, sorte de cause occulte, complexe et vague, qui n'explique rien et qui n'est qu'un aveu d'ignorance. Depuis que Dutrochet a découvert l'endosmose,

on a admis comme évident que cette force suffit pour produire le mouvement des liquides ; car la composition de ceux-ci varie d'une manière continue depuis les racines jusqu'aux feuilles, et si l'on divise par la pensée un végétal en tranches infiniment minces perpendiculaires aux fibres, elles peuvent être considérées comme autant de membranes interposées entre des liquides de nature différente qui, par endosmose, les traversent en proportion inégale, celui qui est au-dessous s'élevant plus abondamment que ne descend celui qui est au-dessus. Je suis loin de nier l'existence de cette action ; il faudrait néanmoins qu'on pût la constater directement et qu'on mesurât son intensité, ce qui n'a jamais été fait. Mais indépendamment de l'endosmose, il y a aussi à considérer l'influence de la capillarité simple, force qui est énorme dans les corps poreux en général et dans les bois en particulier : or, nous allons montrer qu'elle suffit pour prévoir la plupart des phénomènes, en nous appuyant sur les lois qui viennent d'être exposées.

Les physiologistes ont étudié avec une grande persévérance la composition du tissu ligneux ; ils y ont trouvé des tubes relativement larges enveloppés de paquets de fibres serrées. Pendant longtemps ils ont cru que la séve s'élevait par ces tubes ; c'était une erreur qui fut ensuite reconnue : elle monte par les fibres. Cela était évident *a priori* ; car l'eau ne peut s'élever par capillarité dans les tubes qu'à une hauteur insignifiante, tandis qu'elle est attirée par les fibres avec une énergie d'autant plus grande qu'elles sont plus serrées : c'est donc par les parties les plus denses, c'est-à-dire par les couches centrales que la séve doit monter, et les tubes ne peuvent servir qu'à introduire du gaz dans l'intérieur de la masse.

Or, puisque ces tubes ne concourent pas à la pro-

duction du phénomène que nous étudions, nous n'avons pas à nous en préoccuper; nous pourrons admettre qu'ils n'existent pas, et, si nous voulons exclusivement imiter l'ascension de la séve, nous pourrons remplacer le tronc d'un arbre par un corps poreux homogène et quelconque, par exemple par un cylindre en plâtre enfermé dans un tube de laiton AB (fig. 23).

Tout végétal a des racines qui, partant de la base du tronc, vont en se ramifiant, et se terminent par des radicelles très-déliées. Leur surface est lisse, on n'y découvre aucun organe particulier, et il est clair que leur division n'a pour but que de fixer le végétal dans le sol et d'aller chercher au loin l'eau qu'elles prennent à la terre par des points de contact très-multipliés. Sans nous occuper de cette forme destinée simplement à accélérer l'absorption, et ne tenant compte que des conditions théoriques, nous pouvons remplacer les racines par une surface poreuse de forme géométrique simple, par exemple par un vase poreux cylindrique C, rempli de plâtre et qui continuera le tronc.

Enfin la tige elle-même se divise en branches et en rameaux de plus en plus déliés et couverts de feuilles. Cette nouvelle division du tronc n'est pas plus essentielle que la première; nous n'avons point à en tenir compte, et nous sommes autorisés à remplacer toute cette surface évaporatrice par un nouveau vase poreux D, semblable à celui qui est plongé dans le sol.

En résumé, nous simplifions la forme du tronc, des racines et des feuilles; mais nous conservons la surface absorbante, le corps poreux qui conduit les liquides et l'épiderme extérieur qui les laisse évaporer. Nous supprimons tous les organes qui n'ont aucun rapport avec le mouvement de la séve, afin d'isoler la seule des fonctions que nous voulons étudier, et nous

construisons ainsi une sorte de végétal factice qui n'a point de vie, mais qui réunit toutes les conditions nécessaires pour puiser l'eau dans la terre, l'élever continuellement et la répandre en vapeurs dans l'air. Nous suivons ainsi la marche logique qui doit diriger tous les observateurs, et qui consiste à séparer les phénomènes élémentaires qui composent une action naturelle multiple, afin de les pouvoir étudier l'un après l'autre.

Il y a cependant un dernier point dont il nous faut tenir compte. Tous les organes des végétaux sont poreux, sans doute; mais ils n'ont point la même densité de la base au sommet. Il faudrait donc, ou bien tenir compte de ces différences, ou chercher par la théorie quel est l'effet qui en résulte. Or, le calcul prouve que, si on a un cylindre formé par plusieurs milieux superposés quelconques A, B, C, N (fig. 24), tous imbibés d'eau, il y a à chaque surface de séparation des pressions qui s'exercent dans un sens ou dans l'autre; mais que la résultante générale dépend uniquement des deux milieux extrêmes A et N. Il résulte de là qu'il n'y a point à s'occuper des variations successives de la composition des couches ligneuses, et que l'action finale est exclusivement réglée par l'épiderme des racines et par celui des feuilles.

Cela posé, représentons généralement par $p$ la pression capillaire qui s'exerce sur les racines : elle deviendra, suivant une notation précédente $p''$, $p'''$, $p''''$, si le liquide déborde la surface ou affleure à l'épiderme ou recule dans l'intérieur jusqu'à la profondeur de l'attraction sensible. Désignons de même par $p_n$ la pression sur l'épiderme extérieur du vase D, laquelle pourra également prendre dans les mêmes circonstances les valeurs particulières $p''_n$, $p'''_n$, $p''''_n$. La théorie prouve qu'il y a deux forces, l'une agissant de bas en haut,

qui est égale à $p - p''$, l'autre opposée égale à $p_n - p''_n$, et comme le liquide enfermé dans l'appareil exerce de haut en bas une pression égale à la hauteur $h$ du végétal, la force ascensionnelle F du liquide est représentée par la formule suivante :

$$F = (p - p'') - (p_n - p''_n) - h.$$

Cette formule doit représenter tous les phénomènes, et nous allons voir en effet qu'il suffit de la discuter pour les prévoir.

Supposons d'abord que la racine soit plongée dans l'eau, comme cela est représenté figure 23, alors $p$ devient égal à $p''$ et la formule se réduit à

$$F = p''_n - p_n - h;$$

dans ce cas l'action se réduit à deux forces, l'une égale à $p''_n$ qui est constante, qui attire le liquide dans la racine C et le fait monter dans le corps poreux; l'autre $p_n$ qui s'exerce de haut en bas, à la surface supérieure D, et qui est contraire à la précédente. Elle est variable et atteint son minimum $p''''_n$ quand la surface terminale du liquide est retirée à l'intérieur de D jusqu'à la profondeur de l'attraction sensible. Dans ce cas, $p''_n - p_n$ prend la valeur que nous avons appelée A et qui dépasse 10 atmosphères. D'où il suit que, si la hauteur $h$ de l'appareil ne dépasse pas 60 mètres, l'eau devra monter et sa limite supérieure s'approcher de la surface extérieure de D. Mais alors $p_n$ augmentera peu à peu, et la force ascensionnelle diminuera jusqu'à être nulle; alors l'équilibre sera atteint.

Mais cet équilibre ne peut indéfiniment persister, à cause de l'évaporation qui se produit à la surface des feuilles. Hales a spécialement étudié cette évaporation

sur diverses plantes, et en particulier sur un *soleil* qui avait été planté dans un pot vernissé et couvert d'une plaque de plomb. Cette plaque était percée de deux trous, l'un à travers lequel passait la tige, l'autre qui servait à verser dans le pot une quantité d'eau qui était mesurée chaque jour. On pesait la plante matin et soir, et l'on pouvait avec une très-grande approximation apprécier la quantité d'eau qui s'évaporait. La plante avait 39 pieds carrés de surface; elle perdit 1 livre et 4 onces d'eau en douze heures sous l'action d'un soleil intense, 3 onces seulement pendant une nuit chaude et sèche; mais son poids augmentait de 2 ou 3 onces quand il pleuvait.

Ces expériences, qui ont été répétées sur un très-grand nombre de végétaux, prouvent que l'évaporation à la surface des feuilles est due non pas à une action spéciale des plantes, mais à la propriété physique générale de tous les liquides de se répandre en vapeurs dans l'atmosphère, avec une abondance d'autant plus grande que la température est plus élevée et l'état hygrométrique de l'air moindre. Or pendant que ces phénomènes se produisent, la surface extérieure D se dessèche, la couche imbibée recule à l'intérieur, et la pression $p_n$ diminue jusqu'à prendre la plus petite valeur possible, $p_n''''$ : d'où il suit que la force ascensionnelle augmente d'autant plus que la plante perd plus d'eau.

On voit par là que cette force ascensionnelle n'agit qu'au moment où la plante se dessèche, qu'elle rétablit l'équilibre d'imbibition à mesure que l'évaporation le détruit, et que son énergie augmente précisément en raison du besoin d'eau. Pendant les journées chaudes la perte peut dépasser le gain, et la plante commencer à se flétrir; mais aussitôt que la nuit survient, l'afflux du liquide est prédominant, l'équilibre se rétablit, et

au matin suivant le végétal se retrouve prêt à recommencer les mêmes évolutions.

Quand il pleut, la surface extérieure est mouillée; alors $p_n$ est égale à $p_n''$, et F devient négatif : ce qui veut dire que, au lieu de monter, l'eau doit descendre, et que le végétal doit rendre de l'humidité au sol. C'est en effet ce que démontrent les expériences de Hales, confirmées par celles de Müller et de Guettard. Je ferai seulement remarquer que la force d'absorption est égale à $-h$, qu'elle est d'autant moindre que le végétal est moins élevé, et en général beaucoup plus petite que la force ascensionnelle. La rentrée de l'eau dans le sol ne peut donc jamais être abondante; elle sera le plus souvent insensible, et en effet, plusieurs observateurs, parmi lesquels on doit citer M. Duchartre, ont constaté qu'elle n'était pas appréciable avec les petits végétaux.

Jusqu'à présent j'ai supposé que les racines étaient directement plongées dans l'eau; ce n'est pas le cas habituel. Elles sont enterrées dans un sol très-incomplétement humecté, dont elles extraient cependant des masses considérables d'eau. C'est un fait difficilement explicable et qui a dérouté tous les observateurs. Voyons néanmoins comment les choses doivent se passer. Le sol est un corps poreux qui est très-irrégulier; on y trouve des interstices larges et d'autres qui sont très-capillaires, et comme l'eau tend à se réfugier des premiers dans les derniers, on peut les classer par ordre de grandeur, et dire qu'à un moment donné, il en est d'une dimension déterminée qui marquent la limite entre ceux qui, étant plus étroits, sont remplis d'eau, et ceux dont la dimension est plus grande et qui sont vides. Toutes les fois que le sol se dessèche l'eau se concentre dans des espaces limites de plus en plus petits; toutes les fois qu'il se mouille davantage elle

envahit les plus larges par ordre de grandeur croissante. Or on sait que la terre contient une quantité d'eau qui croît avec la profondeur; cela veut dire que la dimension des canaux limites augmente à mesure qu'on s'enfonce, et conséquemment l'eau doit continuellement monter par imbibition successive des parties basses vers la surface, à mesure que celle-ci se dessèche.

Supposons maintenant que l'on enterre dans ce sol un autre corps poreux : l'eau passera de l'un à l'autre et l'équilibre sera établi lorsque les espaces de même dimension qui se trouvent dans tous les deux seront également vides ou également remplis d'eau. Si les conduits du corps poreux enterré sont très-petits, ils devront enlever l'eau de tous ceux du sol qui sont plus larges qu'eux, les vider complétement et se remplir en totalité. Alors on aura, en contact et en équilibre, un corps poreux à grains serrés presque entièrement imbibé, et un sol qui aura cédé la presque totalité du liquide qu'il contenait.

L'expérience confirme très-nettement ces prévisions. Prenons une masse de craie ou de terre de pipe, ou en général d'un corps poreux à grains très-serrés, et plaçons-la dans du sable tassé tout autour. Si elle est imbibée complétement et que le sable soit sec, elle ne lui cède qu'une portion d'eau insignifiante ; si au contraire elle est sèche et plongée dans du sable mouillé, elle enlève à celui-ci presque toute l'eau qui y était en se saturant elle-même. On ne fait qu'utiliser cette propriété quand on dépose sur des briques, de l'argile ou des plaques de porcelaine dégourdie, les précipités qu'on veut sécher.

Cette loi de l'échange des liquides entre deux corps poreux inégalement denses s'applique évidemment aux racines des arbres : l'équilibre entre elles et le sol sera

établi lorsque les conduits de même dimension seront également vides ou également remplis. Et puisque le grain de ces racines est très-serré, elles seront entièrement imbibées dans les terres qui paraissent les moins humides. Elles tendront à se dessécher lorsque l'évaporation se fera à la surface des feuilles; mais alors elles reprendront au sol le liquide qui se sera élevé dans la tige. Pour bien constater tous ces effets, j'ai construit (fig. 25) un appareil composé d'un vase poreux C rempli de plâtre mouillé et plongé dans un sol de sable GG. Un tube capillaire AB s'élevait jusqu'à un alcarazas D, plein d'eau, exposé à l'air, et qui formait une large surface évaporatrice. Enfin un manomètre EFH plongeait dans un bain de mercure H. A mesure que l'évaporation se faisait à la surface, un vide se formait dans l'intérieur de l'alcarazas, et se mesurait par l'ascension du mercure en HF; mais aussitôt l'eau passait du sable GG dans le corps poreux C; elle arrivait en D, et remplaçait celle que l'évaporation répandait dans l'air.

Tant que le sable était notablement humide, l'eau était puisée très-aisément, et l'élévation du mercure ne dépassait pas 2 ou 3 centimètres; mais le sol se séchant peu à peu fournissait moins abondamment et plus lentement l'eau à la racine C et le vide augmentait. Au bout de quelques jours il s'approcha de 700 millimètres, et l'on vit alors que le tube BB′ contenait à la fois des bulles d'air et des index liquides formant un chapelet d'une régularité parfaite et dont les grains se multipliaient à mesure que la dessiccation du sol se continuait. Il arriva un moment où la résistance opposée par ce chapelet fut égale à l'action qui tendait à élever l'eau, et le mouvement s'arrêta. Mais aussitôt qu'on vint à arroser le sable, le phénomène se reproduisit avec son énergie primitive, les bulles d'air dis-

parurent, l'eau afflua dans le vase D, et le mercure baissa considérablement en FH.

Après avoir expliqué d'une manière générale l'élévation des liquides dans les végetaux, il nous reste à examiner les diverses expériences qui ont été faites sur ce sujet, et à montrer que leur résultat pouvait être prévu.

I. Hales ayant creusé le sol au pied d'un pommier, mit une racine à découvert, et l'ayant coupée en A (fig. 26), il la scella dans un tube de verre AB. En courbant cette racine, il plaça d'abord le tube verticalement comme il est figuré en A′B′ par des lignes ponctuées; puis l'ayant rempli d'eau et bouché avec le doigt en B′, il le retourna dans un bain de mercure B. Il vit bientôt la racine absorber de l'eau et le mercure monter jusqu'à 9 pouces, après quoi l'air commença a pénétrer dans le tube et le niveau du mercure à descendre peu à peu.

Nous pouvons répéter la même expérience avec l'appareil représenté figure 23, lequel agit comme le font les végétaux. Il suffit pour cela de maintenir la racine C dans un vase de verre fermé et plein d'eau EE, et d'adapter à celui-ci un manomètre FGH plongeant dans le mercure. Pendant que l'évaporation se fait à la surface supérieure, l'eau est puisée dans le vase EE et le mercure s'élève de H en G, il s'élève même jusqu'à 740 millimètres, ce qui est évident, car l'expérience ne diffère en rien de celle qui a été longuement décrite (page 25). D'un autre côté, elle est identique à celle que Hales avait exécutée sur la racine d'un arbre vivant.

II. Le docteur Boucherie imagina le premier de creuser dans le tronc d'un arbre, et vers sa base, un trou qu'il mit en communication avec un réservoir plein d'eau : celle-ci fut rapidement absorbée. Elle fut ensuite

remplacée par un liquide coloré qui s'éleva jusqu'au sommet des branches les plus hautes et qui pénétra assez intimement les tissus pour les teindre en totalité au bout d'un temps peu long. La même expérience peut être faite et réussit aussi bien avec l'appareil de la figure 23 : il suffit de sceller en M un tube MN plein d'eau et plongeant dans le réservoir N. On s'aperçoit alors que toute l'eau, absorbée par l'appareil, est exclusivement puisée en N.

Pour expliquer ce résultat, il faut se rappeler que la force ascensionnelle pour le cas d'un sol très-humide est

$$F = p''_n - p_n - h,$$

elle varie avec la hauteur $h$ du végétal; elle dépend aussi de l'épiderme extérieur, mais nullement de celui des racines. Or le liquide qui est en contact avec la cavité creusée en M tend aussi à monter avec une force $F'$ qui sera exprimée par la même formule, à l'exception que $h$ sera remplacée par la distance du point M au sommet du végétal, distance que nous représenterons par $h'$, on aura :

$$F' = p''_n - p_n - h',$$

et comme $h'$ est moindre que $h$, $F'$ est plus grande que F : ce qui veut dire que le liquide sera puisé en N plutôt qu'au sol EE.

III. M. Gaudichaud fit une expérience très-intéressante sur des lianes dont la hauteur totale dépassait celle de la pression atmosphérique. Il n'en sortait pas d'eau quand on les coupait par le bas ; mais si on tranchait ensuite le sommet des tiges, on déterminait aussitôt l'écoulement d'une grande quantité de liquide par la section inférieure. Voici comment cette circonstance s'explique.

Quand la tige est plongée dans un sol humide ou bien quand elle est coupée par sa base, la force ascensionnelle ne dépend que de l'épiderme des surfaces supérieures, et à une hauteur *h*, elle est

$$F = p''_n - p_n - h,$$

force qui est nécessairement positive puisque le végétal a atteint la hauteur *h*; mais si on coupe la tige à cette hauteur, on met à nu le tissu ligneux, et alors la force ascensionnelle dépend uniquement des propriétés de ce tissu qui est moins serré que l'épiderme. Il faut donc remplacer les pressions $p_n''$ et $p_n$ de la formule précédente par celles qui conviennent au tissu ligneux, et leur différence, étant moindre que précédemment, F peut devenir négative. Si cela est, l'eau contenue dans la tige doit descendre et s'écouler.

Je pourrais, en discutant les mêmes formules, montrer comment il se fait qu'en général toute plaie faite à un végétal se mouille, comment il peut y avoir dans les végétaux des cavités pleines d'eau ou d'air et quelles sont les conditions qui déterminent ces différences; ou bien faire voir pourquoi il y a moins d'eau dans les tissus à mesure que leur hauteur augmente; mais pour abréger cette étude déjà longue, je terminerai par le plus curieux des phénomènes offerts par les végétaux, c'est celui qu'on appelle *les pleurs de la vigne*.

Au commencement du mois d'avril 1725, Hales coupa un cep de vigne au niveau du sol, et, s'apercevant qu'une grande quantité d'eau s'échappait de la plaie, il essaya de l'arrêter en appliquant à l'extrémité coupée une peau de vessie fortement liée; mais la membrane se gonfla et creva. Il en conclut que l'eau était poussée par une force considérable qu'il voulut mesurer. A cet effet, il remplaça la vessie par un tube de verre ABCD qui était plein de mercure (fig. 27).

Bientôt l'eau s'échappa du cep, et, pressant sur le mercure, elle détermina de C en D une différence de niveau égale à 38 pouces, ce qui équivaut à une pression de une atmosphère et demie environ.

Pour expliquer ce résultat, rappelons que la force ascensionnelle est en général exprimée par la formule

$$F = p - p'' - (p_n - p''_n) - h.$$

Comme à l'époque où les vignes pleurent il n'y a pas d'évaporation sensible à la surface extérieure, l'équilibre doit être atteint, F doit être nul, et il faut que l'on ait

$$p - p'' = p_n - p''_n + h.$$

et, si on considère pour plus de simplicité un point de la surface extérieure situé au niveau du sol, $h$ est nulle et la condition d'équilibre devient

$$p - p'' = p_n - p''_n.$$

J'ai fait voir que la pression moléculaire à la surface d'un corps poreux varie avec sa densité (page 33) ; que, dans un cas particulier, elle est maximum quand le liquide affleure à cette surface et qu'elle diminue soit quand il la déborde, soit quand il recule dans l'intérieur. Supposons que ce cas particulier soit réalisé pour l'épiderme des racines et pour celui de la tige, et que le liquide affleure aux deux surfaces supérieure et inférieure; alors les quantités $p_n - p''_n$ et $p - p''$ sont maxima; mais elles sont inégales puisque les deux corps poreux ne sont pas les mêmes. Si $p_n - p''_n$ est plus grande que $p - p''$, le liquide descendra vers les racines et la surface limite rentrera dans la tige jusqu'à une profondeur très-petite, mais suffisante pour que $p_n - p''_n$ devienne égale à $p - p''$ ; c'est ce

qui arrive quand la tige n'est point coupée; mais si $p_n - p''_n$ est plus petit que $p - p''$, l'eau s'élève des racines au sommet et sort de la plante. A partir de ce moment, $p_n$ devient égal à $p''_n$ et le second membre de l'équation est nul. D'un autre côté, les racines reprennent de l'eau au sol à mesure qu'il en monte dans la tige, $p - p''$ demeure constante, et, pour équilibrer cette pression, il faut que le liquide s'élève jusqu'à une hauteur équivalente, comme dans l'expérience de Hales qui vient d'être rapportée. Ce cas se présente quand la tige est coupée et que l'épiderme extérieur est remplacé par le tissu ligneux mis à découvert.

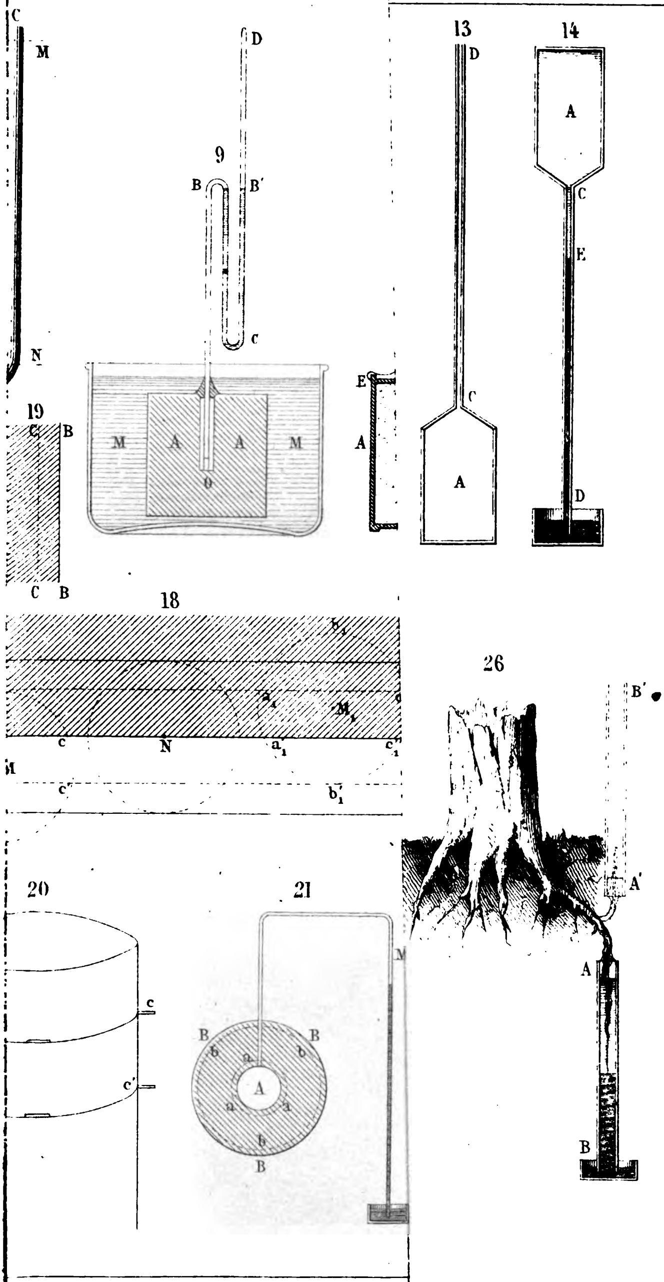
Toutefois le phénomène des pleurs n'est point simple, et, pour que l'explication en soit complète, il est nécessaire de signaler toutes les circonstances qui l'exagèrent ou qui le diminuent. Hales reconnut d'abord que la quantité d'eau éliminée augmente avec la longueur des branches et qu'elle est plus considérable à l'extrémité d'un cep très-étendu qu'au bout d'un rameau coupé près du sol. En second lieu, ce n'est point de l'eau seulement, mais un mélange d'eau et de gaz qui s'échappe des plaies : ainsi Coulomb, ayant fait couper des peupliers au printemps, s'aperçut qu'une succession de bulles d'air et d'index liquides sortaient rapidement et avec bruit de la section. Ces expériences sont confirmées par celles de Hales. Enfin tous les observateurs ont constaté que les pleurs cessent ou au moins diminuent pendant la nuit, et qu'elles deviennent très-abondantes au moment même où le soleil vient frapper sur les branches. En résumé : 1° les pleurs sont un mélange d'air et d'eau; 2° elles se produisent quand le soleil échauffe la plante; 3° elles sont d'autant plus abondantes qu'il y a plus de bois exposé à l'action solaire.

Ces diverses circonstances sont aisément explicables. On sait, en effet, qu'il y a dans les bois des gaz et des liquides; les gaz, d'après ce que nous avons dit précédemment, sont fortement comprimés et leur réaction doit tendre à chasser par les surfaces extérieures un mélange de bulles et d'index liquides. On sait, de plus, qu'ils ont un coefficient de dilatation très-considérable, par conséquent l'action du soleil doit tendre à augmenter leur volume et à exagérer la quantité d'eau éliminée par le végétal.

L'expérience confirme ces raisonnements. Il suffit de plonger dans l'eau chaude une branche de vigne coupée au printemps pour qu'elle pleure aussitôt. La même épreuve réussit avec une masse de craie qu'on a laissée séjourner dans l'eau; quand on la chauffe, elle laisse échapper une quantité très-grande de liquide par tous les points de sa surface.

Je terminerai l'exposé de ces diverses expériences par une seule réflexion. Il y a dans les actions produites au milieu des organes animaux et végétaux, des phénomènes qui dépassent notre intelligence et auxquels il serait sacrilége de toucher : il y a la vie; mais il faut lui faire sa part, et je ne serai démenti par personne si j'affirme qu'il y a aussi des phénomènes exclusivement réglés par le jeu régulier des forces physiques et chimiques. Nous avons le droit et le devoir de les isoler, de les étudier par l'expérience et de montrer qu'ils s'expliquent par les lois de la matière inorganisée. C'est en suivant cette voie que nous parviendrons à connaître le rôle de ces organes que l'anatomie se contente de décrire, et que nous acquerrons une idée nette du mécanisme des fonctions accomplies dans les animaux et les végétaux.

---




Paris - Imp. Janson.

# SUR LA PRODUCTION

DES

# TEMPÉRATURES ÉLEVÉES

ET SUR LA

# FUSION DU PLATINE

PAR M. H. DEBRAY

PROFESSEUR AU LYCÉE CHARLEMAGNE.

LEÇON PROFESSÉE A LA SOCIÉTÉ CHIMIQUE DE PARIS

LE 1er MARS 1861

# I

MESSIEURS,

Le platine est à peine connu depuis cent ans. Importé en Europe à la fin du siècle dernier il y reçut un singulier accueil; il fut employé à faire des contre-poids à raison de son poids spécifique considérable. Sa résistance aux divers réactifs, son infusibilité qui empêchait de le travailler comme les autres métaux, firent penser d'abord que ce serait là son seul usage; mais ces mêmes propriétés devaient plus tard attirer sur lui l'attention des chimistes, qui comprirent bientôt l'immense service que pourrait rendre le platine pour la construction des vases de chimie. Des essais de fabrication furent tentés, mais sans grand succès, jusqu'à l'époque où Wollaston eut imaginé le procédé que l'on suivait encore dans ces dernières années, sans modification importante, dans tous les ateliers où l'on travaille ce métal.

Cette méthode est malheureusement très-détournée; elle est la même, soit qu'il s'agisse d'extraire le platine de son minerai, soit qu'il s'agisse de révivifier le métal altéré par l'usage; par conséquent, le platine des vases mis hors de service par une cause quelconque ne vaut pas plus que le minerai lui-même. De là, la

dépréciation énorme que subit le métal; elle est telle qu'un de ces vases, du prix de 80 000 francs, dans lesquels on concentre chaque jour 4000 kilogrammes d'acide sulfurique, n'est plus vendu que 50 ou 60 000 francs quand il est mis hors de service; ce qui arrive d'ailleurs assez souvent. C'est évidemment là la cause principale qui a restreint l'emploi du platine, et aujourd'hui, comme à l'époque de Wollaston, quoique sur une plus grande échelle, les chimistes et les fabricants de produits chimiques sont les seules personnes qui utilisent ses précieuses propriétés, au prix, il est vrai, de grands sacrifices.

On comprendra alors les raisons qui nous ont engagés, M. H. Sainte-Claire Deville et moi, à chercher des méthodes de fusion du platine, ainsi que les moyens de traiter ses minerais par voie sèche. Nous avons pensé que la solution économique d'un tel problème, en supprimant la cause de dépréciation que subit la valeur du platine, permettrait d'étendre le cercle trop restreint des applications d'un métal précieux à tant de titres et beaucoup moins rare dans la nature qu'on ne le croit communément.

La rareté apparente du platine tient en effet à des causes particulières que le temps modifiera certainement, mais qui ont eu jusqu'ici pour effet d'entraver de la manière la plus fâcheuse le développement de l'industrie de ce métal. Jusque dans ces derniers temps, le platine n'avait été trouvé (en quantité notable du moins) que dans la chaîne de l'Oural et dans la province du Choco (Nouvelle-Grenade). L'Oural possède des gisements platinifères d'une grande richesse; à Nigni Tagilsk, on trouve $1^{g}$ de platine par 7 ou 8 kilogrammes de sable; mais l'exploitation de ces mines, après avoir pris une certaine activité à l'époque où le gouvernement russe fabriquait de la monnaie de pla-

tine, s'est singulièrement ralentie depuis. Les propriétaires des mines ne peuvent en effet disposer à leur volonté de leur minerai ; ils doivent l'envoyer à la *Monnaie* de Saint-Pétersbourg, ou le gouvernement le fait affiner. Ce traitement ne s'effectue guère que sur 1000 à 1200 kilogrammes par an ; la production du minerai est donc naturellement limitée à un chiffre peu élevé. Nous devons dire que le gouvernement russe paraît animé de dispositions plus libérales à l'égard du platine, et nous manquerions à un devoir de reconnaissance si nous ne le remercions publiquement de la générosité avec laquelle il a bien voulu mettre à notre disposition la plupart des matériaux dont nous avons eu besoin dans nos recherches.

Dans la Nouvelle-Grenade, la liberté de l'exploitation des mines est complète ; mais le climat est trop meurtrier pour que les étrangers aient jamais pu songer à y déployer leur activité, et la paresse excessive des naturels a rendu et rendra probablement toujours improductives les immenses richesses accumulées dans le sol de cette contrée. Il ne vient annuellement de la province du Choco que 7 à 800 kilogrammes de platine.

On a trouvé récemment dans l'Orégon du minerai de platine en assez grande abondance. On ne peut douter que les Américains ne mettent à cette recherche toute l'activité qui les caractérise, le jour où les emplois du platine se multiplieront. On peut donc être assuré, quoi qu'il arrive en Russie, que le mouvement de production du minerai suivra tout naturellement le mouvement d'extension des applications, sans qu'il en résulte une augmentation de prix du métal.

Chercher des méthodes de traitement du platine par voie sèche, c'est en définitive chercher les moyens de produire de hautes températures pour les appliquer à

un but spécial : aussi me proposerai-je, dans la première partie de cette leçon, d'examiner avec vous les principes généraux qui peuvent guider les chimistes dans cette étude; je montrerai ensuite qu'ils sont parfaitement d'accord avec ce qu'indique la pratique, en décrivant et en faisant fonctionner les appareils que nous avons imaginés pour fondre et couler des quantités pour ainsi dire illimitées de platine.

## II

### De la *température de combustion* des corps et de l'effet calorifique produit par la combustion.

Je commencerai d'abord par bien préciser le sens et la valeur des nombres donnés par les physiciens pour exprimer la quantité de chaleur dégagée par la combustion des corps.

Supposons que l'on fasse brûler dans une enceinte, entourée de glace à 0°, 1g d'hydrogène et 8g d'oxygène également à 0°. Il se produira de la vapeur d'eau qui se condensera en cédant de la chaleur aux parois. L'expérience terminée, nous trouverons dans l'enceinte 9g d'eau à 0°, nous trouverons également que la chaleur dégagée par cette eau a fondu 435g de glace. Comme on sait qu'il faut 79c, 25 calories pour fondre un gramme de glace, on pourra également exprimer ce résultat en disant que la combustion de l'hydrogène dégage 34 500 calories ($34500 = 79{,}25 \times 435$). C'est ordinairement sous cette forme que l'on exprime la quantité de chaleur dégagée par la combustion de l'hydrogène.

Si l'on fait la même expérience avec 1g d'oxyde de carbone à 0° et la quantité d'oxygène, également à 0°,

qui est nécessaire pour le transformer en acide carbonique, celui-ci sortira de l'appareil à la température de 0° après avoir cédé une quantité de chaleur représentée par 2400 calories.

Il est facile de voir que ces nombres ne sont pas l'expression de quantités de chaleur dégagées dans des circonstances identiques, *au point de vue physique*. Dans la première expérience, l'eau formée est d'abord à l'état de vapeur, mais elle se condense dans le calorimètre et y dégage, en changeant d'état, une quantité notable de chaleur; dans la seconde, le gaz résultant de la combustion est sorti de l'appareil après s'être refroidi jusqu'à 0°, mais il n'a point changé d'état. Par conséquent, les nombres 34 500 et 2400, qui représentent les quantités de chaleur dégagées dans la combustion de l'hydrogène et de l'oxyde de carbone, ne sont pas immédiatement comparables, mais leur valeur pratique n'en est pas moins considérable.

Nous allons voir, en effet, comment on peut se servir de ces nombres pour calculer la température de combustion des corps.

On désigne sous ce nom, la température que prendraient les gaz formés pendant la combustion, si toute la chaleur qui y est dégagée était employée à les échauffer.

Si l'on part de cette définition pour calculer la température de combustion de l'oxyde de carbone, on fera le raisonnement suivant :

14$^{g}$ d'oxyde de carbone en se transformant en 22$^{g}$ d'acide carbonique développent $14 \times 2400$ calories; d'un autre côté, 22 d'acide carbonique absorbent, d'après les expériences récentes de M. Regnault, pour s'élever d'un degré $22 \times 0,2164$ calories (0,2164 étant la chaleur spécifique de l'acide carbonique); par conséquent, si toute la chaleur dégagée dans la combustion

est employée à échauffer l'acide carbonique, la température[1] de ce gaz sera donnée par la formule

$$T = \frac{14 \times 2400}{22 \times 0,2164} = 7070 \text{ environ.}$$

Si l'oxide de carbone brûle dans l'air, la temperature de combustion sera notablement moins élevée, car la chaleur dégagée pendant la combustion sera non-seulement employée à échauffer l'acide carbonique qui en résulte, mais en outre l'azote de l'air qui a fourni l'oxigène nécessaire. On sait que dans l'air 8$^g$ d'oxigène accompagnent 26$^g$ 7 d'azote, on sait de plus que la chaleur spécifique de l'azote est 0,224; la température[1] de combustion sera donc donnée par la formule

$$T = \frac{14 \times 2400}{22 \times 0,2164 + 26,7 \times 0,224} = \frac{33000}{11,23} = 3000^{\circ} \text{ environ.}$$

Mais dans le cas où la combustion produit de l'eau, il faut modifier légèrement la marche du calcul; prenons pour exemple la combustion de l'hydrogène dans l'oxigène.

Un gramme d'hydrogène en brûlant développe 34 500 $^{cal}$, et produit 9$^g$ d'eau ramenés à la température de 0°. Voyons à quelle température ces 34 500 $^{cal}$ pourraient amener les 9$^g$ d'eau. Il faudra d'abord donner 100$^{cal}$ à chaque gramme d'eau pour l'échauffer à 100°, puis 540 pour le transformer en vapeur sans changer sa température; à partir de ce point, chaque élévation de température de 1° nécessitera une absorption de chaleur égale à 0$^{cal}$,475, ce nombre représentant d'après M. Regnault la chaleur spécifique de la vapeur d'eau. C'est ce qu'exprime l'équation

$$34500 = 9 \times 640 + 9 \times 0.475\,(T - 100)$$

dans laquelle T représente la température de combustion comptée à partir de 0°.

On en tire $T = 6800$ environ.

Je ferai remarquer que ce nombre est notablement inférieur à 8000°, température assignée par la plupart des auteurs à la flamme de l'hydrogène. La cause de ce désaccord tient tout simplement à ce que ces auteurs ont négligé de tenir compte de l'influence du changement d'état auquel est due une notable quantité de la chaleur recueillie dans le calorimètre; leur nombre, ainsi que tous ceux qui sont relatifs aux températures des produits hydrocarburés devront donc être calculés de nouveau.

Un raisonnement du genre de celui que nous venons de faire nous montrerait que la température de combustion de l'hydrogène dans l'air est d'environ 2600°.

L'établissement de ces diverses formules suppose implicitement que la chaleur spécifique des gaz ou des vapeurs est indépendante de la température. M. Clausius a cherché à justifier cette hypothèse par des considérations théoriques; les expériences récentes de M. Regnault ont démontré que, pour l'air, le coefficient restait constant entre 30° et 225°; nous n'en conclurons pas néanmoins qu'il en soit ainsi à toutes les températures : nous ne considérerons donc nos résultats que comme des approximations propres à mieux fixer les idées.

Les nombres qui expriment les températures de combustion de l'oxyde de carbone et de l'hydrogène dans l'air ou dans l'oxygène mettent bien en évidence la nécessité où l'on est d'employer l'oxygène pour obtenir des températures élevées; il faut examiner maintenant *l'effet utile* que nous pouvons obtenir avec ces flammes dans des circonstances déterminées.

Supposons qu'il s'agisse de calculer la quantité de platine que l'on peut fondre avec $1^g$ d'hydrogène ou avec $14^g$ d'oxyde de carbone (je prends ces nombres parce qu'ils représentent les poids de volumes égaux de ces gaz). Il faudra, pour établir le calcul, connaître deux choses : 1° la température de fusion du platine; 2° la quantité de chaleur qu'il faut donner à $1^{kil}$ de platine pour le porter de la température de 0° à son point de fusion et pour le fondre ensuite. — J'estimerai la température de fusion du platine à 2000°; je discuterai tout à l'heure les raisons qui nous font accepter ce nombre. Quant à la quantité de chaleur dont j'ai besoin, nous l'avons déterminée expérimentalement, M. Deville et moi, en coulant dans l'eau la partie liquide d'une masse de platine qui commençait à se solidifier, et notant l'élévation de température de cette eau; nous avons trouvé ainsi qu'il suffisait de $100^{cal}$ (en nombres ronds) pour échauffer et fondre $1^k$ de platine primitivement à 0°. Il résulte de là que ce métal tellement incandescent, lorsqu'il est fondu, que l'œil peut à peine en supporter l'éclat, n'exige pas plus de chaleur pour être porté à cet état, qu'un même poids d'eau pour être porté à la température de 100°, où ce liquide commence à bouillir.

Si nous nous servons d'hydrogène pour opérer la fusion du platine, et si nous supposons que toute la chaleur perdue par la vapeur dans l'appareil où on l'effectue soit exclusivement employée à fondre le métal, l'eau qui sort de l'appareil ayant encore une température de 2000°, aura nécessairement cédé au platine la quantité de chaleur nécessaire pour échauffer la vapeur d'eau de 2000° à 6800°.

Le poids du métal fondu par un gramme d'hydrogène sera donc donné par l'équation

$$x \times 100 = 9 \times 0.475\ (6800 - 2000) = \qquad x = 205^g.$$

Si l'on se servait d'oxyde de carbone, on trouverait que 14ᵍ d'oxyde de carbone peuvent servir à fondre

$$a \times 100 = 22 \times 0.2164\,(7000 - 2000) = \quad x = 238^{gr}.$$

Ici se place naturellement une remarque importante. L'oxyde de carbone produit plus de chaleur que l'hydrogène sous le même volume ou à équivalents égaux. L'opinion contraire généralement reçue est donc erronée, et si l'on a continué à croire que de tous les corps l'hydrogène est celui qui dégage le plus de chaleur *utilisable*, cela tient seulement à l'erreur commise dans le calcul de la température de combustion de ce gaz, qui donnait un nombre beaucoup trop élevé. J'ajouterai, pour montrer qu'en de pareilles matières l'examen attentif des faits est encore un meilleur guide que les raisonnements basés sur des chiffres plus ou moins contestables, que la conclusion à laquelle nous conduisent nos nouveaux calculs avait déjà été formulée, il y a longtemps, par notre illustre président : M. Dumas ne manquait pas chaque année, à son cours de la Sorbonne, de faire ressortir, par quelques-unes de ces expériences si concluantes qui servaient toujours de base à ses démonstrations, l'intensité calorifique si grande de la flamme de l'oxyde de carbone, tout à fait comparable selon lui par les effets qu'elle produisait avec celle de l'hydrogène.

Les formules précédentes peuvent se traduire ainsi en langage ordinaire : « La quantité de chaleur cédée par une flamme à un corps s'obtient en multipliant l'excès de la température de combustion de la flamme sur la température du corps par la chaleur spécifique du corps produit dans la combustion et par le poids de ce corps. » Ce qu'on peut exprimer par la formule générale

$$a = pc\,(T-t),$$

forme sous laquelle l'équation devient très-facile à discuter.

Mais avant d'aborder cette discussion, il importe de montrer que la valeur des raisonnements qui vont suivre ne serait nullement infirmée, si l'on démontrait par une vue quelconque que la température réelle de combustion n'est pas celle que nous avons déduite du calcul. En effet, si T était réellement inférieur au nombre calculé, il faudrait que la chaleur spécifique augmentât avec la température; mais comme le produit ne change pas si la chaleur spécifique des gaz est constante jusqu'à t°, le produit $c(T-t)$ représente un nombre constant, quel que soit d'ailleurs le changement qu'éprouverait la chaleur spécifique au-dessus de cette température de t°. Il n'y a donc aucune espèce d'erreur à raisonner avec notre formule comme T était réellement déterminé.

On peut en déduire plusieurs conséquences pratiques importantes :

1° Pour fondre ou chauffer un corps avec une flamme dans laquelle le poids des produits de combustion n'est jamais bien considérable, il faut que la *température de combustion* soit de beaucoup supérieure à la température du phénomène que l'on veut produire, puisque dans la pratique il y aura toujours une perte considérable de chaleur éprouvée par le corps, soit par rayonnement, soit par conductibilité. La flamme devra réparer à chaque instant cette perte de chaleur; ce qui restera de chaleur disponible sera seul employé à échauffer le corps;

2° Si l'on ne dispose pas d'une flamme ayant une température de combustion notablement plus élevée que celle que l'on veut obtenir, il faudra augmenter le poids des produits de la combustion en activant cette combustion ; en d'autres termes, il faudra brûler dans

un temps donné la plus grande quantité de combustible possible.

Je développe ces conséquences.

Si nous chauffons un creuset de platine dans la flamme de l'hydrogène alimentée par l'air, nous n'arrivons jamais à produire la fusion du métal. Ici l'excès de température (T—*t*) ne serait que 600°; or, le platine incandescent rayonne une trop grande quantité de chaleur pour que sa température puisse s'élever près du point de fusion : elle s'élèvera (je suppose vers 1200 ou 1300) jusqu'au moment où la quantité de chaleur rayonnée, ou perdue par la conductibilité du support, sera égale à la quantité de chaleur cédée par la flamme en s'abaissant à cette température. Il est bien clair que l'abaissement de cette dernière sera moindre si l'on vient à augmenter le poids des produits de combustion, aussi M. Deville emploie-t-il dans sa lampe destinée à produire la fusion des verres peu fusibles que l'on prépare pour l'analyse des silicates, de l'essence de térébenthine dont la vapeur est 68 fois plus lourde que celle de l'hydrogène, et dont la température de combustion dans l'air est de 2550° seulement; en quelques instants le platine est porté à l'incandescence, et la température du creuset peut facilement être maintenue à 15 ou 1600°, c'est-à-dire à la température de fusion du fer.

Pour arriver à fondre du platine avec des flammes alimentées par l'air, il faut opérer sur des quantités extrêmement petites de métal; on peut le prouver en plaçant dans la partie brillante de la flamme d'une bougie un fil de platine très-délié : il est rapidement porté à l'incandescence et ne tarde pas à fondre. Si nous augmentons la masse du platine, en augmentant proportionnellement la masse des produits de combustion, nous arriverons nécessairement à produire le

même effet; nous aurons en définitive réalisé l'expérience de M. Deville sur la fusion du platine et du quartz dans les fourneaux ordinaires. Je rappellerai cette expérience. Le platine était contenu dans un double creuset en chaux, muni d'un couvercle également en chaux, que l'on plaçait dans une grille en fonte percée de trous, par lesquels arrivait l'air d'un soufflet de forge. Le creuset était entouré d'un manchon en terre réfractaire; on brûlait dans cet appareil des escarbilles, c'est-à-dire un charbon très-divisé et poreux qui offrait à l'air une surface de contact très-étendue et brûlait par conséquent avec une grande rapidité.

Ici la température de combustion est de 2630° environ, l'excès (T-$t$) n'est donc que de 630°; mais le poids $p$, des produits formés dans un temps très-court est considérable, par conséquent la fusion est possible. On a pu fondre ainsi 50 ou 60 grammes de platine, et, dans une expérience, le métal a même été volatilisé. Cette expérience, qui nous a servi de point de départ dans les recherches que nous avons faites depuis en commun, peut servir à fixer jusqu'à un certain point la température de fusion du platine. Il est bien clair, d'après ce qui précède, qu'elle est inférieure à 2600°; mais je vais faire voir qu'elle doit être notablement inférieure à ce nombre. Il y a, en effet, dans l'expérience de M. Deville, plusieurs causes qui tendent à abaisser la température de combustion. Je me contenterai d'en signaler une qui a été si bien mise en évidence par Ebelmen, dans ses beaux travaux sur les phénomènes qui se produisent dans les hauts fourneaux. Dans tout fourneau alimenté par l'air, il y a à la partie inférieure une zone très-peu élevée où la combustion du carbone peut être considérée comme complète; un peu au-dessus, l'acide carbonique formé se transforme en oxyde

de carbone et produit un abaissement de température. D'après Ebelmen, dans un haut fourneau, où cependant les moyens d'insufflation de l'air sont si puissants, on doit admettre qu'à quatre décimètres au-dessus de la tuyère, la transformation de l'acide carbonique en oxyde de carbone est complète. Il est bien clair que, dans des fourneaux ordinaires, cet espace sera beaucoup plus restreint. Si donc on avait un creuset ayant quelque longueur, on voit que sa partie inférieure serait dans la zone de combustion complète, sa partie supérieure dans la zone de combustion incomplète, et sa température serait une moyenne entre les deux températures. Ajoutons, du reste, que la conductibilité du combustible, toujours notable dans ces conditions, tend à produire le même effet. On peut donc prendre pour température du platine fondu une moyenne entre la température des deux zones. Pour déterminer la température de la zone de réduction, il suffit de remarquer que la quantité de chaleur dégagée par le charbon se transformant en oxyde de carbone est indépendante de la manière dont la combustion s'effectue. On trouve ainsi qu'elle est de 1460°. Ce nombre est plus élevé que ne le pensait Ebelmen, qui avait employé pour son calcul des nombres que les expériences de M. Regnault nous ont démontré être inexacts. La température de 2000° est donc peu éloignée de celle de fusion du platine; nous l'admettrons comme une limite probablement supérieure.

Nous arriverons encore au même résultat en nous appuyant sur quelques-uns des résultats intéressants que M. Person a obtenus dans ses travaux sur les chaleurs latentes de fusion.

Les chaleurs latentes de fusion des métaux fusibles, étain, plomb, zinc, bismuth, sont d'autant plus fortes que le métal est plus résistant à la traction, ou, en

d'autres termes, que son coefficient d'élasticité est plus considérable. De là cette première idée de chercher s'il n'y a pas proportionnalité entre les quantités de chaleur latente de deux métaux et leurs coefficients d'élasticité, relation que nous exprimerons de la manière suivante :

$$\frac{l}{l'}=\frac{k}{k'},$$

mais l'expérience démontre qu'elle n'est qu'approchée. On arrive à représenter exactement les résultats de l'expérience par une formule si l'on multiplie les coefficients d'élasticité $k$ et $k'$ par un facteur dans lequel entre la densité du métal ; la formule modifiée devient alors

$$\frac{l}{l'}=\frac{k}{k'}\frac{\left(1+\frac{2}{\sqrt{d}}\right)}{1+\frac{2}{\sqrt{d'}}}.$$

Il y avait intérêt à vérifier cette expression dans le cas d'un métal bien moins fusible que ceux qui avaient servi à l'établir. C'est ce qu'a fait M. Person. En partant de la chaleur de liquidité du zinc, il a calculé la chaleur de liquidité de l'argent, il a trouvé ainsi 20.38; l'expérience directe lui a donné 20.07, de sorte que l'accord est aussi parfait que possible entre les résultats de l'expérience et de la théorie.

Servons-nous de cette relation pour déterminer la température de fusion du platine. D'après le calcul de M. Person, en partant de la chaleur de fusion du zinc, la chaleur de fusion du platine serait $38^c$; si nous retranchons cette quantité de 100 calories, qui sont nécessaires pour amener le platine de la température de $0^\circ$ à l'état de fusion, il nous restera 62 calories qui auront servi à porter le platine de $0^\circ$ à sa température $x$ de fusion,

cette température sera donc donnée par la formule $x = \frac{62}{0.0324} = 1910^\circ$ environ.

Estimation très-voisine de celle que nous avons déduite de la considération des températures de combustion.

Cette température de 1900 ou de 2000° n'est pas à beaucoup près la limite de ce que nous atteignons facilement et pratiquement sur une échelle un peu considérable, et surtout de ce que nous pouvons raisonnablement espérer obtenir. Nous fondons en effet des quantités énormes de platine avec le gaz de l'éclairage et l'oxygène; mais il nous est impossible de fondre par ce moyen l'iridium ou le ruthénium : pour ces métaux, nous devons avoir recours à l'emploi de l'hydrogène et de l'oxygène purs; il est probable que nous ne pourrions aller plus loin dans l'échelle des températures avec cette flamme, parce que la masse des produits brûlés est peu considérable; mais rien ne nous empêche de répéter l'expérience de M. Deville avec du charbon et de l'air mélangé d'une proportion plus ou moins forte d'oxygène. Ici nous réunirons les deux éléments qui font que l'effet utile d'une combustion est plus considérable, puisque nous pourrons obtenir une masse bien plus grande de produits de combustion en même temps qu'une température élevée; le charbon est, en effet, de tous les corps connus, celui qui donne la température de combustion la plus élevée; d'après le calcul, elle serait d'environ 10 000° si on opérait la combustion dans l'oxygène pur.

Je ne crois pas qu'il soit jamais possible d'atteindre ce point (1); mais nous pouvons nous élever peu à peu

(1) Bien avant cette limite les produits de la combustion doivent éprouver les phénomènes désignés par M. Deville sous le nom de

dans l'échelle des températures en mélangeant de l'oxygène à l'air jusqu'à ce que nous arrivions à volatiliser la dernière des susbstances réfractaires, chaux ou magnésie, dont nous faisons usage; nous aurons obtenu alors la limite supérieure des températures qu'il est possible de réaliser.

On pourrait me reprocher de n'avoir pas parlé de la pile comme moyen de produire des températures élevées; il est manifeste qu'on trouvera de grandes difficultés toutes les fois qu'on voudra fondre par son intermédiaire des quantités de matière un peu considérables; en admettant que ces difficultés soient surmontées, l'emploi de la pile n'en constituerait pas moins un moyen bien détourné et bien dispendieux de produire de la chaleur. Il est bien plus rationnel de s'adresser directement à l'affinité chimique pour l'obtenir, à moins qu'il nous soit démontré (ce qui est peu probable) que nous n'avons aucun avantage à le faire. Sans entrer ici dans des considérations théoriques plus ou moins spécieuses, mais qui n'auraient au fond aucune certitude absolue, puisque nous ne connaissons pas encore comment les forces de la nature se transforment les unes dans les autres; sans vouloir démontrer que la pile, étant un intermédiaire à l'aide duquel nous transformons l'affinité chimique en chaleur, doit produire moins d'effet utile que l'affinité elle-même; nous pouvons, en restant dans le domaine des faits, montrer qu'il n'est peut-être pas d'effet calorifique obtenu par la pile que nous puissions produire par la combustion directe. Des corps réfractaires ont été fondus avec la pile : nous les fondons égale-

*Phénomènes de dissociation*, il en résultera nécessairement des changements dont nous pouvons seulement apprécier le *sens* aujourd'hui sans qu'il soit possible dans l'état actuel de la science d'en fixer la valeur.

ment à l'aide du chalumeau et dans beaucoup de cas sans leur donner le contact du charbon, qui rend d'ordinaire les substances métalliques plus fusibles qu'elles ne le sont lorsqu'elles restent pures. La chaux, la magnésie ont été volatilisées dans l'arc voltaïque; ici le phénomène est complexe et les cônes de charbon y ont joué un rôle important; la chaux et la magnésie, qui résistent si bien dans nos appareils à la température de fusion du platine ou de l'iridium, s'y volatilisent promptement dès qu'elles ont le contact du charbon. Il y a donc de la part de ce dernier une action décomposante, qui met en liberté le métal volatil de ces bases, qui brûle en régénérant la chaux ou la magnésie dès qu'il n'a plus le contact du charbon. Mais nos flammes oxydantes peuvent réellement volatiliser ces corps. Il y a longtemps que M. Gaudin, en employant de petites quantités de chaux ou de magnésie les a volatilisées dans la flamme de l'éther alimentée par l'oxygène. Nous croyons donc pouvoir dire que les chimistes n'ont aucune raison, à l'heure qu'il est, d'abandonner les moyens si directs qu'ils emploient pour produire de hautes températures, d'autant plus que ces moyens n'ont pas encore donné tout ce qu'il est raisonnablement permis d'en attendre.

## III

### De la fusion du platine.

L'appareil qui va nous servir à fondre et à couler le platine, devant vous, comme un métal ordinaire, se compose de deux parties distinctes : le chalumeau destiné à produire la chaleur nécessaire à l'opération, et le four ou creuset qui doit contenir le métal soumis à la fusion.

Le chalumeau est composé d'un cylindre EEE'E', de 12 millimètres de diamètre, en cuivre, terminé à sa partie inférieure par un ajutage en platine légèrement conique. Un tube de cuivre CC de 3 à 4 millimètres de diamètre intérieur et terminé par un bout de platine qui s'y ajuste à vis, pénètre dans le premier cylindre par sa partie supérieure et y est maintenu par une vis de pression P qui permet, lorsqu'elle est desserrée, de donner au bout de platine la hauteur que l'on veut, par rapport à l'extrémité inférieure du cylindre EEE'E'.

Ce cylindre porte latéralement une tubulure assez large, à laquelle est adapté un robinet H *de grande section*. Un robinet O termine également l'extrémité coudée du tube C. C'est par le robinet H que l'on fera arriver, au moyen d'un tube de caoutchouc le gaz de l'éclairage servant de combustible; c'est par le robinet O que sera introduit l'oxygène destiné à le brûler. L'extrémité inférieure du tube qui amène l'oxygène est percé d'un trou dont le diamètre varie de 2 à 3 millimètres, suivant les dimensions du four que l'on veut employer.

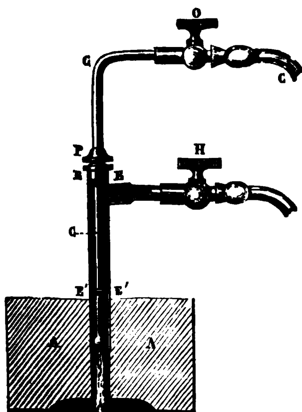


Fig. 1.

Le four où se fait la combustion se compose de deux parties :

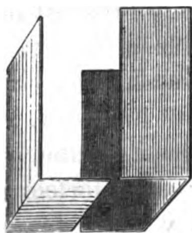
1° La voûte AA (fig. 1) formée d'un morceau de chaux rendue cylindrique au tour, et que l'on a légèrement cintrée à sa partie inférieure. Elle est en outre percée en son axe d'un trou légèrement conique par où pénètre le chalumeau et porte latéralement une rainure peu profonde.

2° D'une sole creusée dans un autre morceau de chaux également cylindrique, la cavité est une calotte sphérique dont la hauteur est à peu près les deux tiers du rayon du cercle de base. Sur le bord de cette calotte on pratique avec une râpe une rainure inclinée en dedans, qui correspondra à celle de la voûte. C'est par l'ouverture qu'elles forment par leur réunion que les produits de la combustion s'échapperont, c'est également par là que le métal sera introduit pour être fondu et qu'il sera coulé. Enfin, et pour empêcher l'appareil de se briser pendant l'opération, la voûte et le four sont entourés de fils de fer fortement serrés qui maintiendront les diverses parties de l'appareil, si le feu vient à les fissurer.

Pour faire une fusion, on commence par ajuster la voûte sur le four de manière à faire correspondre les rainures, puis, tenant le chalumeau à la main, on ouvre le robinet H pour faire arriver un assez faible courant de gaz combustible que l'on enflamme; on ouvre le robinet O de manière à donner la quantité d'oxygène nécessaire pour le brûler. On fait alors plonger la flamme dans le trou de la voûte et l'on y fixe le bout du chalumeau. On chauffe lentement les parois du four, en augmentant peu à peu la vitesse du gaz, jusqu'à ce que l'on ait atteint le maximum de température; avec une lame de platine que l'on introduit par l'ouverture latérale et que l'on met dans le jet de gaz, on juge bientôt du point où la chaleur est la plus vive, c'est-à-dire du point ou la fusion se fait le mieux. En abaissant où élevant au besoin l'orifice du tube qui amène l'oxygène, on arrive à chauffer assez fortement le fond du four pour que le platine y reste fondu, tout en laissant le maximum de chaleur un peu au-dessus. On assujettit alors la vis et l'on introduit peu à peu le platine par l'ouverture latérale. Si le platine

est en lames minces de moins de 1$^{m}$ d'épaisseur, on a à peine le temps de les introduire. On les voit disparaître presque aussitôt qu'elles entrent dans le four. L'oxygène doit arriver avec une certaine pression, de 4 à 5 centimètres de mercure environ, et peut alors imprimer au platine fondu un mouvement gyratoire qui régularise la température dans toute sa masse, et qui facilite en même temps l'affinage.

Quand on ne veut pas couler le platine, la fusion étant complète et l'affinage terminé, ce que l'on voit à ce qu'il ne se forme plus de matière vitreuse à la surface du métal, on diminue peu à peu la vitesse des deux gaz en laissant dominer le gaz réducteur, mais en léger excès. Il se manifeste alors une ébullition très-sensible dans la masse métallique, due à la production de vapeur d'eau et d'acide carbonique qui résultent de la combustion du gaz de l'éclairage par l'oxygène dissous dans le platine; nous avons montré en effet que ce métal et plusieurs de ses congénères avaient comme l'argent la propriété singulière d'absorber l'oxygène quand ils sont fondus. Ainsi les voit-on *rocher* quand on les refroidit brusquement dans ces circonstances. En diminuant peu à peu les gaz comme nous venons de le dire, la solidification s'opère graduellement; quand le métal est solide on éteint le foyer.


Fig. 2

Quand on voit couler le platine on peut se servir d'une lingotière en fer épais dont la surface est bien recouverte de plombagine, de lingotière en charbon de cornues; mais celles qui donnent les meilleurs résultats sont les lingotières en chaux. On les obtient en assemblant des plaques de chaux taillées, entre deux plaques de tôle, que l'on réunit l'une contre l'autre au moyen de fils

de fer; elles forment alors un étui rectangulaire dans lequel peuvent être solidement fixées les diverses pièces de la lingotière en chaux.

On enlève la voûte, on saisit le foyer avec des pinces et l'on coule le platine sans se presser comme on le ferait pour un métal ordinaire. La seule difficulté que l'habitude apprend à surmonter, c'est de pouvoir distinguer en même temps l'ouverture béante de la lingotière et la surface éblouissante du platine, afin de pouvoir verser le métal à coup sûr. Mais cette opération ne peut être faite sur une quantité un peu considérable de platine, on courrait trop de danger dans le cas où l'une des parties de l'appareil viendrait à céder: nous ne la tenterons même pas ici; nous emploierons pour effectuer cette coulée la disposition suivante (fig. 3),

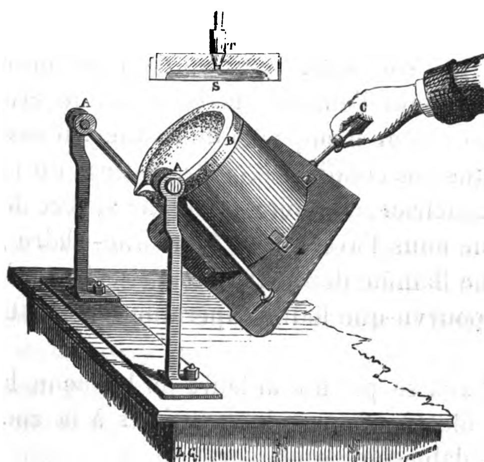



Fig. 3.

qui évite tous les inconvénients que nous venons de signaler. La sole du four en chaux est placée sur une plate-forme en tôle, où elle est maintenue par un cylindre de tôle fixé à la plate-forme. Celle-ci est mobile autour d'un axe horizontal qui passe par l'ouverture

du trou de coulée D. Elle peut en effet glisser au moyen d'écrous le long de deux tiges portant à leur partie supérieure deux tourillons autour desquels s'effectue la rotation de l'appareil, lorsqu'on vient à soulever la plate-forme à l'aide d'une queue C que l'on fera mouvoir avec la main. Avec cette disposition, il suffit, lorsque le métal est prêt à couler, d'appliquer l'ouverture de la lingotière contre l'ouverture latérale du four et de faire basculer la plate-forme.

L'appareil étant décrit, examinons-le maintenant au point de vue des principes que nous avons établis dans la première partie de cette leçon; nous aurons également à faire ressortir le rôle chimique important joué par la matière même qui compose ses parois.

On voit d'abord que la combustion a lieu au contact même du métal fondu; on évite ainsi la perte considérable de chaleur qui se produit quand on chauffe un creuset par son extérieur; on peut en outre voir à chaque instant l'état du métal dans le creuset que rien d'extérieur n'empêche de manier. Il devient possible dans ces conditions, si la matière du creuset est peu conductrice, d'employer comme source de chaleur, ainsi que nous l'avons fait, M. Sainte-Claire Deville et moi, une flamme donnant une masse de produits assez faible, pourvu que leur température soit suffisamment élevée.

La chaux se prête d'ailleurs de la façon la plus remarquable par toutes ses propriétés à la construction de semblables appareils.

1° Elle est infusible et indécomposable aux températures les plus élevées dont on a besoin pour la fusion des métaux les moins fusibles; elle conduit très-mal la chaleur, à ce point qu'on peut impunément toucher avec la main les parois extérieures du four dans lequel le platine commence déjà à fondre. Quand la fusion

est terminée, la température de l'extérieur ne s'élève pas au plus de 150°. Nous avons pu faire une de ces opérations en plaçant le creuset sur un large bouchon de liége sans qu'il ait été brûlé.

2° La chaux rayonne la chaleur et la lumière avec une intensité remarquable. On s'en est servi à cause de cette propriété pour obtenir la lumière de Drummond. Notre four est donc un four à réverbère par excellence.

3° La chaux joue un rôle chimique important dans l'opération ; elle agit sur toutes les impuretés dont on a intérêt à débarrasser le platine. Le fer, le cuivre, le silicium, etc., oxydés par l'oxygène de la flamme, forment avec la chaux des combinaisons fusibles qui pénètrent dans les pores du creuset. Ce n'est pas une simple fusion que nous faisons éprouver au platine dans nos appareils, c'est un affinage, et le plus complet de tous ceux qu'on peut lui faire éprouver. Aussi le métal qui en sort est-il d'une ductilité remarquable.

D'après les nombreuses expériences que nous avons faites au laboratoire de l'École normale, sur des quantités très-variables de métal, nous pouvons dire que 60 litres d'oxygène suffisent avec 120 litres d'hydrogène pour fondre un kilog. de platine et le maintenir à l'état de fusion pendant toute la durée de l'affinage ; ces nombres nous permettent de comparer le rendement pratique de notre appareil avec les résultats du calcul. Supposons en effet que pour fondre un kilog. de platine, sans l'affiner, il faille employer 55 litres d'oxygène et 110 litres d'hydrogène, c'est-à-dire 10 grammes de ce gaz. Le calcul nous montre que ce poids d'hydrogène peut produire la fusion de 2 kilog. de platine ; par conséquent, en partant même de cette estimation trop élevée de 55 litres d'oxygène pour *la fusion simple*, nous arriverons encore à cette conséquence que les

pertes causées par la conductibilité, l'échauffement du four et la sortie du gaz, ne s'élèvent pas à 50 pour 100 de la chaleur théoriquement utilisable. Il est peu d'appareils industriels dont on en puisse dire autant.

Aussi le prix de revient d'une telle fusion est-il extrêmement minime, et d'après nos calculs elle ne dépasserait pas, si on en faisait une opération journalière, 20 ou 30 centimes par kilogramme, c'est-à-dire la millième partie de ce que coûte aujourd'hui la révivification du métal par les procédés de voie humide.

Nos appareils peuvent également servir à fondre le rhodium, l'iridium ou leurs alliages et même à traiter directement les minerais. Pour fondre l'iridium il faut de toute nécessité employer le gaz hydrogène et l'oxygène aussi pur que possible. On peut avec ces gaz en fondre de très-grandes quantités ; ainsi, dans une de nos opérations, nous avons fondu et coulé 1950 grammes d'iridium parfaitement purifié; l'on n'avait pu jusqu'ici que fondre de très-petites quantités de ce métal réfractaire, quelques décigrammes tout au plus.

Quant aux minerais, ils peuvent être traités directement dans les fours. Sous l'influence de la température élevée qui s'y développe et de l'oxygène en excès, l'ormium qu'ils contiennent à l'état d'osmiure d'iridium disparaît en produisant des vapeurs d'acide osmique très-dangereuses à respirer et contre lesquelles on ne saurait trop prendre de précautions; aussi ne faut-il faire cette opération, même lorsqu'on opère sur une petite quantité, qu'en prenant le soin de placer l'ouverture du four devant l'ouverture d'un tuyau d'appel ou d'une bonne cheminée de four à vent. Les autres matières étrangères contenues dans le minerai, fer, cuivre, silice, etc., sont absorbées par les parois du four, toujours fortement corrodées dans ce genre d'opération. Quand l'odeur d'osmium a disparu, l'opé-

ration est terminée et le métal qui reste dans le creuset n'a plus besoin que d'être refondu pour pouvoir se travailler. On n'obtient pas ainsi du platine pur, mais un alliage de platine, d'iridium et de rhodium bien préférable au métal pur. Il joint à une inaltérabilité plus grande une élasticité et une dureté qui ne nuisent pas à la facilité du travail et qui le rendent moins facile à déformer. Aussi l'usage de ces alliages naturels ou artificiels se répand-il aujourd'hui; on commence même à en fabriquer les grands appareils qui servent à la distillation de l'acide sulfurique.

---

# LEÇON

## SUR L'ÉTUDE OPTIQUE

# DES SONS

PROFESSÉE LE 5 AVRIL 1861

DEVANT LA SOCIÉTÉ CHIMIQUE DE PARIS

**PAR M. LISSAJOUS**

PROFESSEUR DE PHYSIQUE AU LYCÉE SAINT-LOUIS.

Messieurs,

Les recherches que je vais avoir l'honneur d'exposer devant vous ont pour objet l'établissement d'une méthode optique qui permet d'étudier les sons à l'aide de l'œil et sans le secours de l'oreille.

Les sons, vous le savez tous, sont dus à des mouvements oscillatoires très-rapides exécutés par les corps. Ces mouvements se communiquent aux milieux élastiques, solides, liquides ou gazeux, qui entourent le corps sonore, et sont ainsi transmis de proche en proche jusqu'à l'organe auditif. L'impression perçue par l'oreille dépend évidemment de la nature du mouvement vibratoire qui en est la cause première. Mais cet organe est, comme tous nos sens, sujet à illusions et à erreurs. Il est donc permis de se demander si toutes les circonstances qui caractérisent le mouvement du corps sonore ont leur traduction fidèle dans l'ensemble des impressions perçues par l'organe de l'ouïe.

Cette question est de la plus haute importance aux yeux des personnes qui s'occupent d'acoustique. De sa solution dépend en effet le degré de confiance et de sécurité que l'on peut espérer dans les recherches où l'on n'a d'autre guide que l'appréciation de l'oreille. Les physiciens ont dû se la poser plus d'une fois, si l'on en juge par les efforts faits à plusieurs reprises pour

établir par des moyens directs les lois des mouvements vibratoires. C'est ainsi que Mersenne a étudié les oscillations des cordes et Chladni celles des lames, dans le cas où ces oscillations étaient assez lentes pour pouvoir être comptées, et qu'ils les ont ensuite étendues au cas des oscillations infiniment rapides qui produisent les sons. Cette extension, peu conforme à la vraie méthode scientifique, trouvait néanmoins une justification imparfaite dans les prévisions de l'analyse mathématique.

La première méthode vraiment directe qui ait été appliquée à l'étude des mouvements vibratoires est due à Young. Ce physicien imagina de fixer au corps vibrant un pinceau léger et flexible qui participait à son mouvement oscillatoire. Il faisait glisser sous ce style une surface animée d'un mouvement continu suivant une direction perpendiculaire aux vibrations, et le pinceau traçait sur le papier une ligne sinueuse reproduisant dans les détails de son tracé tout ce qu'il y avait de caractéristique dans le mouvement vibratoire du corps sonore.

Ce procédé fut expérimenté par Savart. M. Duhamel lui donna un plus haut degré de sensibilité en opérant le tracé à l'aide d'une pointe flexible de métal sur une lame de verre enduite de noir de fumée. C'est sous cette forme qu'il fut appliqué par Wertheim dans ses études importantes sur l'élasticité. Enfin M. Scott a eu récemment l'idée d'appliquer un style sur une membrane tendue à l'orifice d'une sorte de conque et de faire tracer les vibrations de ce style sur un papier noirci. Il a ainsi constitué une sorte d'oreille artificielle qui perçoit les sons et en fournit le tracé. Cet appareil ingénieux a reçu de son auteur le nom de phonautographe.

Malgré les services importants que la méthode gra-

phique a rendus et rendra sans doute encore à la physique, on peut craindre qu'elle ne donne pas tout ce qu'on est disposé à en attendre. N'est-il pas en effet naturel de penser qu'il y a dans bien des mouvements vibratoires certaines finesses de détail dont le frottement du style empêche la reproduction fidèle et complète; et si d'ailleurs le simple bon sens ne nous suggérait pas *à priori* cette critique, le contrôle de l'oreille, si sensible aux différences de timbre les plus délicates, ne nous laisserait aucun doute à cet égard.

Pour éviter ces objections, le moyen le plus sûr consistait à étudier directement à l'aide de l'œil le mouvement vibratoire dans le corps sonore lui-même. Tel est le problème que je me suis posé et dont je dois vous exposer ici la solution. Au premier abord il paraît difficile de le résoudre: comment en effet obtenir une sensation permanente et caractéristique à l'aide d'un mouvement qui, par son extrême rapidité, semble échapper à toute perception? Heureusement, la périodicité même de ce mouvement détermine sa reproduction identique à intervalles infiniment rapproches, et transforme en une impression permanente la sensation fugitive donnée à nos organes par chacune de ces rapides oscillations.

Il n'est personne d'entre nous, Messieurs, qui n'ait dans son enfance, au risque d'incendier la maison paternelle, plongé une baguette dans le foyer, pour l'agiter ensuite et suivre, avec la curiosité naturelle au jeune âge, ces lignes brillantes produites par l'extrémité embrasée comme par un pinceau magique dont la trace fugitive s'effacerait en un instant. Telle est l'expérience qui a servi de base à notre méthode optique. Elle avait du reste déjà inspiré au célèbre Wheatstone un de ses plus curieux appareils. Remplaçons en effet la baguette par une tige élastique d'a-

cier, la main par une lourde masse de plomb, le bout embrasé par une perle de métal poli dont la surface étincelle sous une vive lumière, et tout mouvement communiqué par un choc à l'extrémité mobile de la tige fera naître l'apparence de couches lumineuses dont la forme même caractérisera ce mouvement. Cet ingénieux appareil est connu sous le nom de kaléidophone. Son auteur n'a pas eu l'idée de généraliser le principe de cette expérience et d'en faire le point de départ d'une méthode propre à l'étude des sons. Mais les titres de gloire de l'illustre physicien sont si nombreux qu'il ne peut regretter d'avoir laissé à un autre le mérite d'avoir récolté quelques fruits sur le champ où son génie avait ouvert un premier sillon.

Les premiers essais que j'ai faits dans cette voie m'ont été inspirés par le désir de rendre les mouvements vibratoires visibles à tout un amphithéâtre, en y appliquant la méthode de projection dont M. Paul Desains tirait alors un parti si utile dans son cours de physique à la Faculté des sciences de Paris.

J'ai opéré d'abord avec des diapasons : cet appareil est de tous les corps vibrants le plus facile à manier. Ce n'est du reste qu'une application particulière d'un principe dont je me réserve de faire ressortir la généralité.

La première expérience a pour but de faire voir le mouvement vibratoire qui produit le son du diapason.

Pour cela il suffit de fixer sur la face convexe du diapason, à l'extrémité d'une des branches, un petit miroir de métal ; l'autre branche porte un contre-poids, afin d'égaliser la surcharge des deux branches, sans cela le diapason vibrerait mal. Regardons dans ce miroir l'image réfléchie d'une bougie placée à quelques mètres de distance, puis faisons vibrer le diapason ;

nous voyons aussitôt l'image s'allonger dans le sens de la longueur des branches. Faisons alors tourner le diapason autour de son axe, l'apparence change, et nous voyons dans le miroir une ligne brillante et sinueuse dont les ondulations accusent par leur forme même l'amplitude plus ou moins grande du mouvement vibratoire.

Voulons-nous rendre le phénomène visible dans toute l'étendue d'un amphithéâtre, prenons pour source de lumière le soleil ou la lumière électrique, dont nous faisons passer les rayons à travers une ouverture circulaire de petite dimension. Le faisceau horizontal qui a traversé cette ouverture est reçu sur le miroir du diapason, dont l'axe est placé verticalement; de là il est renvoyé sur un second miroir, et de là sur un écran, après avoir traversé une lentille convergente de foyer convenable. On peut en déplaçant la lentille obtenir sur l'écran une image nette de l'ouverture. Dès qu'on fait vibrer le diapason, cette image s'allonge dans le sens vertical. Pour la transformer en ligne sinueuse, il suffit de faire tourner le deuxième miroir autour d'un axe vertical, de façon que la pointe du faisceau réfléchi parcoure l'écran dans le sens horizontal.

L'explication de ce phénomène est des plus simples: le pinceau de lumière réfléchi par le miroir du diapason doit osciller dès que celui-ci oscille lui-même, l'extrémité de ce pinceau décrit donc dans le fond de l'œil ou sur l'écran une ligne droite dont les divers points restent illuminés pendant un temps égal à la durée de la persistance de la sensation visuelle. Si la durée de cette sensation est de beaucoup supérieure à la durée d'une oscillation complète, la ligne paraît éclairée dans toute son étendue et elle est nécessairement plus lumineuse à ses extrémités, où le mouvement

est moins rapide. Si on joint au mouvement oscillatoire du diapason un mouvement de rotation du deuxième miroir, alors l'extrémité du pinceau réfléchi trace une ligne sinueuse soit dans l'œil, soit sur l'écran.

Cette première expérience n'est qu'un moyen de démonstration, celles qui vont suivre renferment en réalité le principe et le développement de la méthode optique. Elles nous feront voir en effet comment on peut comparer entre eux deux sons à l'aide de l'œil, et connaître non-seulement le rapport numérique de ces deux sons, mais toutes les circonstances qui caractérisent leurs mouvements relatifs.

L'expérience se fait très-simplement, à l'aide de diapasons armés de miroir: on place l'axe de l'un des diapasons verticalement, et l'axe de l'autre horizontalement, les miroirs en regard. On dirige vers le premier miroir un faisceau de lumière parti d'une petite ouverture; ce faisceau se réfléchit, tombe sur le miroir du deuxième diapason et est renvoyé de là sur un miroir fixe qui le projette sur un écran blanc placé plus ou moins loin. Une lentille interposée en un point convenable sur le trajet de ce faisceau brisé donne sur l'écran une image nette et brillante de l'ouverture. Dès qu'on ébranle le diapason vertical, on voit l'image s'allonger et se transformer en une ligne verticale. Vient-on à ébranler le diapason horizontal, l'image devient une ligne horizontale; si on ébranle les deux diapasons à la fois, l'image se trouve alors animée à la fois de deux mouvements oscillatoires de directions rectangulaires, et décrit sur l'écran une ligne sinueuse plus ou moins compliquée, dont la forme dépend de la relation qui existe entre la durée de l'oscillation dans chacun des deux mouvements. Cette courbe, quelle que soit d'ailleurs sa forme, sera

toujours comprise à l'intérieur d'un rectangle dont les dimensions dans le sens horizontal et vertical ont pour limite les amplitudes extrêmes des deux mouvements vibratoires dont l'image est animée.

Si les durées des deux vibrations sont commensurables, c'est-à-dire si le premier diapason exécute un nombre entier de vibrations tandis que l'autre en exécute un autre nombre également entier, le point lumineux, dans le mouvement qu'il accomplit sur l'écran, revient exactement à son point de départ et recommence ensuite à parcourir la même trajectoire. Si la trace de ce point était ineffaçable, la courbe tout entière resterait inscrite sur l'écran, et il serait facile de l'étudier. Heureusement l'œil conserve pendant un certain temps (environ $\frac{1}{15}$ de seconde) l'impression produite par la lumière sur un point de la rétine. Il apercevra donc simultanément sur l'écran toute la partie de la trajectoire parcourue par le point lumineux en $\frac{1}{15}$ de seconde. Si cette durée est plus grande que le temps employé par le point lumineux pour revenir à son point de départ, la courbe paraîtra illuminée dans toute son étendue; et comme le point lumineux parcourt sans cesse le même trajet, l'impression se renouvellera pour chaque point avant d'être éteinte; elle acquerra donc un caractère de continuité qui nous permettra de voir la courbe comme si elle était réellement inscrite en traits de feu sur l'écran. Si, au contraire, la durée de la persistance de la sensation visuelle est moindre que le temps employé par le point lumineux pour parcourir toute la trajectoire, cette courbe ne sera éclairée que dans une partie de son étendue seulement; comme la trace lumineuse s'éteint dans les parties que le point lumineux mobile abandonne, et se rallume dans la partie qu'il atteint successivement, on verra la partie obscure se déplacer

d'un mouvement rapide et continu le long de la courbe : il en résultera donc des apparences que nous analyserons plus tard.

Nous nous contenterons d'admettre pour commencer : 1° que les nombres de vibrations effectuées dans un même temps par les deux diapasons sont dans un rapport simple ; 2° que le temps nécessaire pour que les deux diapasons aient accompli un nombre entier de vibrations est assez court pour que la courbe soit illuminée d'une façon permanente dans toute son étendue. La première condition est d'ailleurs réalisée toutes les fois que les nombres de vibrations que l'on compare correspondent à un des intervalles usités en musique. Le cas le plus simple qui puisse se présenter, est celui où les deux corps vibrants exécutent le même nombre de vibrations dans le même temps. On dit alors que les sons correspondants sont à l'unisson. Dans ce cas, la courbe est une ligne droite, une ellipse ou un cercle. Si on trace un rectangle ayant pour dimension les amplitudes des deux mouvements oscillatoires exécutés sur l'écran par le point lumineux, l'ellipse est toujours tangente aux quatre côtés de ce rectangle, et la ligne droite est l'une ou l'autre des diagonales de ce rectangle.

Ces différences de formes indiquent une relation particulière qui existe entre les deux mouvements vibratoires, et à laquelle on donne le nom de différence de phase. On sait, en effet, que deux mouvements oscillatoires, tout en étant identiques quant à leur période, peuvent différer par l'époque à laquelle chaque oscillation commence. Ainsi deux balanciers peuvent battre rigoureusement la seconde et cependant ne pas passer au même moment par la verticale ; de même, deux diapasons à l'unisson, en vibrant simultanément de part et d'autre de leur forme d'équilibre, peuvent

ne pas passer au même instant par cette forme intermédiaire autour de laquelle leurs mouvements vibratoires s'exécutent. Quand il en est ainsi, on dit que les deux diapasons ne sont pas au même instant dans la même phase de vibration, ou bien encore on dit qu'il y a entre les deux mouvements vibratoires une certaine différence de phase. Cette différence de phase se mesure de la manière suivante : on dit qu'elle est égale à $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, quand il s'écoule la moitié, le tiers, le quart d'une vibration complète entre les moments précis où les deux diapasons passent dans le même sens par leur forme d'équilibre. La différence de phase exprime donc la durée qui sépare le commencement des deux vibrations les plus voisines appartenant à deux mouvements vibratoires différents, mais simultanés. Il est évidemment inutile, dans le cas de l'unisson, de considérer les différences de phases supérieures à l'unité.

Quand la différence de phase est nulle, la trajectoire décrite par le point lumineux sur l'écran est une ligne

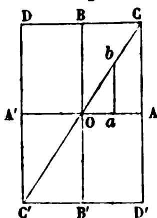


Fig. 1.

droite, soient en effet O, la position de ce point avant tout mouvement vibratoire, A A' les limites de son excursion dans le sens horizontal, B B' les limites de son excursion dans le sens vertical quand les deux mouvements vibratoires ont lieu. En même temps qu'il marche d'une certaine quantité O*a* dans le sens horizontal, il monte d'une certaine quantité *a b*, dans le sens vertical, le rapport de *ba* à O*a* est constant et égal au rapport des amplitudes extrêmes CA et OA des deux mouvements vibratoires ; le point lumineux décrira donc la diagonale OC du rectangle CDC'D', puis il reviendra de C en O, ira de O en C' et reviendra au point O.

Dans le cas où la différence de phase est égale à $\frac{1}{2}$, le point lumineux est à l'extrémité de son excursion horizontale, c'est-à-dire en A, quand il commence à s'élever dans le sens vertical, il s'élèvera donc de la quantité O B pendant qu'il rétrograde de droite à gauche de la quantité O A, et décrira ainsi un arc de courbe allant de A en B. Par les mêmes raisons il ira de B en A', puis en B', puis en A, et décrira une courbe fermée tangente au rectangle C D C' D' en A, B, A et B'; on prouve facilement que cette courbe est une ellipse. Elle devient un cercle si les amplitudes A A' et B B' sont égales.

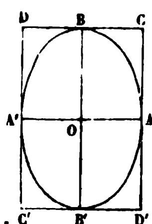


Fig. 2.

Quand la différence de phase est égale à $\frac{1}{2}$, la figure redevient une ligne droite, joignant non plus les sommets C et C', mais les sommets D et D' du rectangle. Enfin, quand la différence de phase est égale à $\frac{1}{3}$, l'ellipse A B A' B' de la figure 2 se reproduit de nouveau, seulement elle est parcourue par le point lumineux, non pas dans le sens A B A' B', mais en sens inverse. Pour les différences de phases intermédiaires on a des ellipses intermédiaires; l'ensemble de ces figures avec les différences de phases correspondantes est indiqué fig. 4.

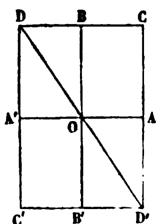
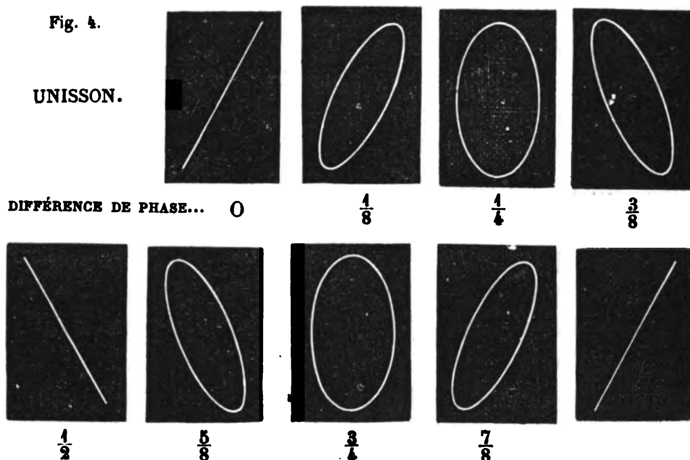


Fig. 3.

Tout ce que nous avons dit jusqu'à présent suppose que l'amplitude des vibrations reste constante pour chaque diapason, et que leur unisson est rigoureux, si la première condition ne peut pas être remplie, puisque les diapasons, une fois ébranlés et abandonnés à eux-mêmes, reviennent peu à peu au repos. Il en résulte donc une diminution correspondante dans les dimensions verticale et tranversale de la courbe, qui finit par se réduire à un point.

Quant à la deuxième condition, si elle n'est pas remplie rigoureusement, il en résulte un changement




progressif dans la différence de phase, et par suite une transformation progressive dans la courbe, qui passera successivement par toute les apparences représentées fig. 4. Cette espèce de balancement produit dans la courbe lumineuse fournit un moyen très-précis de mesurer la quantité dont l'unisson est attirée, En effet, quand la courbe a accompli le cercle complet de ses transformations, la différence de phase s'est évidemment accrue d'une unité et l'un des deux corps vibrants a exécuté une vibration complète de plus que l'autre. Supposons, par exemple, que nous opérions avec des diapasons qui font environ 500 vibrations simples par seconde. Si l'unisson est altéré de telle sorte que le renversement complet de la courbe et un retour à la même forme s'effectue en 80 secondes, l'un des diapasons ayant fait dans ce temps 40 000 vibrations simples, l'autre en aura exécuté 40 000, plus ou moins une. Nous aurons donc constaté une différence de $\frac{1}{10000}$ entre

les deux vibrations exécutées simultanément par les deux corps vibrants. Il m'est arrivé plus d'une fois d'accorder par ce moyen deux diapasons avec une précision au moins double, c'est-à-dire à un quatre-vingt millième près.

Du reste, la sensibilité de ce procédé est telle que la moindre différence de température produit dans l'unisson de diapason une altération sensible à l'œil, quoique absolument imperceptible pour l'oreille. Ainsi le contact de la main pendant huit à dix secondes produit sur un diapason pesant près de 500 grammes une modification sensible.

Après l'étude des figures données par deux diapasons à l'unisson vient naturellement l'examen des courbes fournies par deux diapasons à l'octave, c'est-à-dire dont les nombres simultanés de vibrations sont dans le rapport de 1 à 2. Ces figures sont représen-

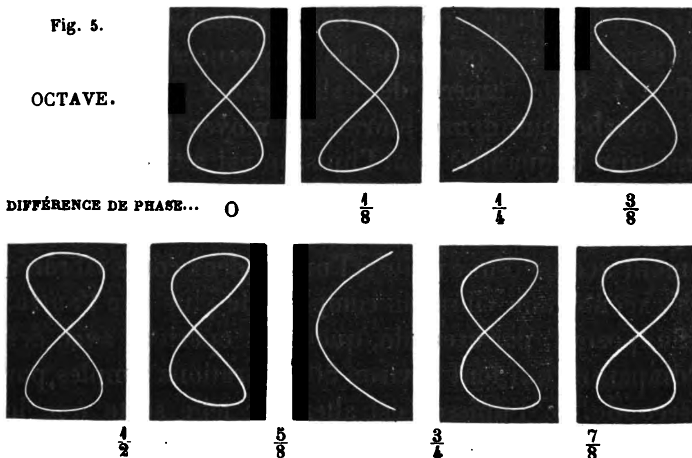


Fig. 5. OCTAVE.

tées fig. 5, avec les différences de phase correspondantes. Dans ce cas, comme dans ceux qui vont suivre, la différence de phase est mesurée en prenant

pour unité la durée de la vibration complète du diapason le plus grave, que nous aurons soin de supposer toujours dans la position verticale.

Si nous supposons une légère altération dans l'octave, la figure, au lieu de rester semblable à elle-même, se transforme progressivement, en prenant toutes les apparences indiquées au tableau, et quand cette transformation a ramené la figure à sa forme primitive, on est sûr que l'on a eu une différence égale à une vibration complète sur le diapason grave, ou à deux vibrations sur le diapason aigu, relativement au nombre qu'aurait donné l'octave juste.

Chacun des intervalles musicaux correspond à un rapport simple entre les nombres des vibrations du son considérés, ainsi l'unisson correspond à $\frac{1}{1}$, l'octave à $\frac{1}{1}$, la quinte à $\frac{3}{2}$, la quarte à $\frac{4}{3}$. A chacun de ces intervalle correspond également une série de figures. Ainsi les figures de la quinte sont indiquées fig. 6.

Fig. 6.

QUINTE.

DIFFÉRENCE DE PHASE... 0 $\frac{1}{16}$ $\frac{1}{8}$ $\frac{3}{16}$

$\frac{1}{4}$ $\frac{5}{16}$ $\frac{3}{8}$ $\frac{7}{17}$ $\frac{1}{2}$

Chacune de ces figures porte en elle-même l'indication

de l'intervalle musical auquel elle correspond, ou plutôt du rapport numérique existant entre les nombres de vibrations correspondants. En effet, supposons par exemple qu'il s'agisse de l'intervalle de quinte, les nombres de vibrations produits dans le même temps sont entre eux comme deux et trois ; le nombre deux correspond par exemple à la vibration verticale, le nombre trois à la vibration horizontale ; il résulte évidemment de ces hypothèses que le point lumineux qui décrit la courbe devra, pour la parcourir dans son entier, osciller trois fois de droite à gauche et de gauche à droite, tandis qu'il oscille deux fois de bas en haut et de haut en bas ; par suite il atteindra trois fois la limite de son excursion horizontale vers la droite par exemple, tandis qu'il atteindra deux fois la limite de son excursion verticale vers le haut par exemple ; il suffit de compter le nombre de sommets que la courbe présente dans la partie latérale, et le nombre de sommets qu'elle possède à sa partie supérieure, pour avoir le rapport exact des nombres de vibrations exécutées simultanément par les deux diapasons.

Toutes les fois que l'intervalle musical auquel on a affaire n'est pas tout à fait exact, cette altération se traduit par une transformation progressive de la figure. Ces transformations sont la source de certaines illusions d'optique sur lesquelles nous demandons à insister ici, d'autant plus qu'elles fournissent à l'observateur l'indication, en quelque sorte spontanée et tout à fait imprévue, de l'interprétation géométrique de ces sortes de phénomènes.

Lorsque les deux diapasons sur lesquels on opère ne sont pas tout à fait d'accord, la figure qu'ils produisent, et dont la forme dépend du rapport approché de leur nombre de vibrations, se modifie peu à peu, et il semble qu'au lieu d'une courbe plane qui se trans-

forme, cette figure soit une courbe à double courbure qui tourne autour d'un axe soit vertical, soit horizontal, et se présente à nous successivement sous divers aspects par le seul effet de la perspective. Tantôt on la voit tourner de droite à gauche, tantôt de gauche à droite. Tantôt l'axe de rotation paraît horizontal, tantôt il paraît vertical. Souvent enfin la rotation est remplacée par une sorte de balancement dans lequel la figure tourne alternativement dans un sens et dans l'autre.

Pour expliquer ces diverses apparences, nous rappellerons d'abord qu'un mouvement oscillatoire tel que celui des corps vibrants peut être considéré comme la perspective d'un mouvement circulaire uniforme vu d'un point situé à grande distance dans le plan de la circonférence sur laquelle ce mouvement s'accomplit. Ainsi, quand on fait tourner une manivelle, le bouton de cette manivelle paraît animé d'un mouvement oscillatoire pour un observateur dont l'œil est placé dans le plan même dans lequel cette manivelle accomplit sa révolution. Supposons que ce plan soit un plan horizontal, et admettons en outre que le bouton de la manivelle soit disposé de façon à monter et descendre sur la tige verticale à laquelle il est fixé, de manière à osciller le long de cette tige pendant que celle-ci tourne, et nous aurons la même apparence que si ce bouton était soumis à la fois à un double mouvement oscillatoire, l'un horizontal, l'autre vertical. Ainsi un point qui exécute en même temps une vibration verticale et une vibration horizontale peut être considéré comme une perspective d'un autre point qui tourne autour d'un cylindre à axe vertical pendant qu'il effectue le long des arêtes du cylindre un mouvement d'oscillation dans le sens vertical. Par exemple, un point qui exécute à la fois deux oscillations dans le

sens vertical et trois dans le sens horizontal sera la perspective d'un point qui tournerait trois fois autour d'un cylindre à axe vertical, tandis qu'il oscillerait deux fois de part et d'autre d'une circonférence tracée sur ce cylindre perpendiculairement à son axe.

La courbe décrite par ce point sur le cylindre est vue en perspective, comme si elle se projetait sur un plan contenant l'axe du cylindre et perpendiculaire à la direction suivant laquelle vise l'observateur. Cette courbe étant une fois tracée géométriquement sur ce cylindre fictif, sa projection aura une forme variable suivant le plan diamétral du cylindre sur lequel on la projectera, c'est-à-dire suivant le point du contour du cylindre vis-à-vis duquel se tournera l'œil de l'observateur. Au lieu de supposer que l'observateur tourne autour du cylindre portant la courbe, nous pouvons supposer que c'est le cylindre lui-même qui tourne devant l'observateur, et alors la courbe constante qu'il entraîne dans sa rotation donnera des perspectives variables correspondant aux diverses différences de phases. C'est pour cela que le changement continu de forme dans la courbe, produit par le désaccord des diapasons, semble une véritable rotation d'une seule et même figure autour d'un axe.

Cet axe peut être vertical ou horizontal. En effet, un mouvement correspondant à deux vibrations dans le sens vertical et trois dans le sens horizontal peut être considéré comme donnant une figure tracée sur un cylindre vertical, figure dans laquelle, à deux oscillations dans le sens vertical, correspondent trois tours autour du cylindre, ou, au contraire, à une figure tracée sur un cylindre à axe horizontal, figure dans laquelle, à trois oscillations dans le sens horizontal, correspondent deux tours effectués autour du cylindre. Parmi ces deux interprétations, l'œil adopte instinctivement

celle qui paraît la plus naturelle. Or, dans une figure, on conçoit mieux la rotation autour de la plus grande dimension qu'autour de la plus petite ; c'est pourquoi l'œil adopte pour axe de rotation la direction verticale, si l'amplitude est plus grande dans le sens vertical que dans l'autre. Dans le cas inverse, c'est, au contraire, la direction horizontale qui paraît être celle de l'axe de rotation. Quant au sens de la rotation, il est déterminé par le choix de la partie de la figure que l'on considère comme postérieure ou antérieure. Or, comme l'égale illumination des deux systèmes de traits permet de prendre à volonté pour partie antérieure l'une ou l'autre portion du tracé, il en résulte nécessairement que, suivant le point de la figure sur lequel l'attention se porte, l'œil croit la voir tourner soit dans un sens, soit dans un autre. Cette apparence pouvant se modifier par les mêmes raisons avant même que la figure n'ait effectué un tour complet, on conçoit qu'on peut avoir, au lieu de l'apparence d'une rotation, l'apparence d'un simple balancement autour de l'axe.

Cette sorte d'illusion d'optique par laquelle nous substituons à une figure plane la courbe à double courbure dont elle est censée être la perspective, peut être rendue plus manifeste encore à l'aide du stéréoscope. On réalise cette apparence à l'aide de deux courbes qui ne sont autre chose que les apparences que prend la même figure pour deux états vibratoires entre lesquels il y a une très-faible différence de phase.

Le tracé de toutes les courbes relatives à l'étude optique des sons peut s'effectuer par divers procédés. Nous avons donné d'abord un moyen pratique permettant de tracer un certain nombre de points de nos diverses courbes; en réunissant ces points par un trait continu, on obtenait les courbes avec plus ou moins de précision

Plus tard, j'ai pu, avec le concours de M. Froment, combiner une machine qui permet d'obtenir par un tracé continu les courbes correspondant aux rapports les plus simples, c'est-à-dire à ceux dont les termes sont compris entre 1 et 8.

L'étendue de cette leçon ne nous permet que d'exposer brièvement le principe de cet appareil sans donner en aucune manière le détail de sa construction. Supposons deux règles de directions rectangulaires glissant chacune dans une coulisse. Sur l'une des règles est fixé un papier, sur l'autre un traçoir. Supposons que l'on communique par un moyen quelconque à chacune des deux règles un mouvement oscillatoire, le crayon tracera évidemment sur le papier la courbe correspondant à la composition graphique de ces deux mouvements.

Les expériences que nous avons exécutées devant vous ont certainement excité l'intérêt qui s'attache toujours à des phénomènes brillants et nouveaux; mais elles resteraient sans utilité au point de vue scientifique, si elles ne nous fournissaient le moyen d'établir les principes d'une méthode propre à résoudre un grand nombre de questions relatives à l'étude du son. C'est ce qu'il nous reste à prouver en exposant devant vous les applications de cette méthode et le moyen de la généraliser.

L'oreille, vous le savez, messieurs, est un organe des plus sensibles; néanmoins il est sujet à erreur, ainsi tout son intense paraît plus bas qu'il n'est en réalité. Cet abaissement se manifeste par exemple d'une façon frappante quand on ébranle fortement un diapason pris sur une caisse sonore. Le simple éloignement du diapason, en affaiblissant l'intensité du son lui rend sa tonalité véritable, et montre déjà que cet abaissement n'est qu'une illusion. Néanmoins cette assertion est

démontrée d'une façon tout à fait rigoureuse par la méthode optique. On reconnaît en effet par ce moyen que le diapason pour les grandes et les petites amplitudes ne présente qu'une différence de tonalité infiniment faible et tout à fait inappréciable à l'oreille.

Quoique très-faible cette différence peut être appréciée par les moyens optiques. Supposons en effet deux diapasons accordés à un intervalle musical simple, quarte ou quinte par exemple. Si on vient à établir entre eux un léger désaccord, on voit la figure correspondante exécuter ses évolutions ordinaires. Le mouvement de rotation qui se produit alors n'a pas la même rapidité, quand on combine les vibrations de grande amplitude du premier diapason avec les vibrations de faible amplitude du second, ou bien quand on fait l'inverse. Ainsi dans les deux cas le désaccord n'est pas le même; il y a donc entre les grandes et les petites vibrations du même diapason une différence de rapidité que l'œil constate, quoique l'oreille ne puisse en aucune manière la percevoir.

La méthode optique permet d'étudier d'une façon saisissante le phénomène connu en acoustique sous le nom de battement. Pour peu qu'on ait fait vibrer ensemble deux corps voisins de l'unisson, on n'est pas sans avoir remarqué que leur désaccord se manifeste par des renflements périodiques dans le son qu'ils produisent. Cet effet est dû à ce que les ébranlements communiqués à l'air par les deux corps sonores agissent tantôt dans le même sens, tantôt en sens inverse, et produit une impulsion égale tantôt à la somme, tantôt à la différence de leur intensité. Cette explication peut être confirmée optiquement de la manière suivante : On prend deux diapasons à l'unisson, armés de miroirs; on les place en regard dans la situation verticale. On fait tomber un pinceau de lumière sur le

premier miroir, il est envoyé de là sur le second, puis renvoyé sur l'écran en un certain point. Dès qu'on fait vibrer l'un des diapasons, le point se transforme en une ligne lumineuse verticale, comme dans une expérience précédente. Si on fait vibrer les deux diapasons à la fois, l'allongement de l'image est plus grand ou plus petit, suivant qu'il y a ou non coïncidence entre les mouvements simultanés communiqués à celle-ci par les vibrations des deux diapasons. Cet allongement a son maximum si les deux diapasons sont dans la même phase de vibration, car alors les mouvements communiqués à l'image par les deux vibrations sont de même sens et s'ajoutent. Il a au contraire son minimum quand la différence de phase est égale à $\frac{1}{2}$, car alors les mouvements communiqués à l'image sont de sens contraires et se retranchent. Dans le cas où les diapasons sont rigoureusement d'accord, la trace lumineuse éprouve simplement un décroissement progressif de longueur, dû à l'extinction des vibrations, mais dans le cas où l'accord est légèrement altéré, alors la trace lumineuse éprouve dans sa longueur des variations périodiques, et, en même temps que l'oreille entend le battement, l'œil aperçoit les pulsations concomitantes de l'image. Toutes les fois que la différence de phase entre les deux sons a varié d'une unité, c'est-à-dire toutes les fois que l'un des deux sons a exécuté deux vibrations simples de plus que l'autre, l'image revient au même degré d'allongement, et dans ce même intervalle il s'est produit un renflement dans le son. On voit donc par là que chaque battement correspond à une différence de deux vibrations simples dans le nombre de vibrations exécutées simultanément par les deux corps sonores.

La méthode optique permet de déterminer avec précision, non-seulement les nombres relatifs de vibra-

tions de deux corps sonores, mais encore le nombre absolu de vibrations correspondant à un certain son. Prenons en effet trois diapasons, A, B, C, armés de miroirs, ce qui permettra de vérifier leur accord. Accordons A de façon qu'il fasse 5 vibrations pendant que C en fait 6, B de façon qu'il en exécute 6 pendant que C en fait 7. Ces diapasons sont tous les trois très-graves.

Pendant que C fait une oscillation simple, A en fait $\frac{5}{6}$ et B $\frac{6}{7}$. Donc, pendant que C fait 42 oscillations simples, A en fait 35 et R. 36. Pendant que C fait 84 oscillations simples, A en fait 70 et B 72. La différence est donc de 2 oscillations simples. Si l'on connaissait donc la différence entre les nombres d'oscillations simples exécutées simultanément dans un certain temps par les diapasons A et B, on n'aurait qu'à le multiplier par 42 pour avoir le nombre de vibrations exécutées dans le même temps par le diapason C.

Or, cette différence peut s'obtenir facilement si les diapasons A et B ont un son suffisamment grave, car alors ils seront assez voisins de l'unisson pour fournir des battements. En comptant donc soit à l'aide de l'œil, soit à l'aide de l'oreille le nombre de battements exécutés dans un temps donné, on aura le double de la différence entre les nombres de vibrations simples exécutées par les deux diapasons dans le même temps. Une fois le nombre de vibrations de C connu, on pourra s'en servir comme d'un diapason type pour obtenir par les moyens usités en acoustique le nombre de vibrations correspondant à un son donné.

Toutes les expériences qui précèdent ont été exécutées avec des diapasons armés de miroirs. Cette disposition, commode pour la démonstration, ne peut pas s'appliquer à toute espèce de corps vibrant. D'ailleurs, comme me le fit observer judicieusement M. Despretz,

lors de mes premières communications à l'Institut, la surcharge produite sur le corps vibrant par le miroir modifie le ton du corps vibrant lui-même. Je suis parvenu à éviter cet inconvénient par l'emploi d'un instrument particulier auquel j'ai donné le nom de *comparateur optique des mouvements vibratoires*.

Cet instrument, dont la disposition peut varier suivant les applications qu'on en fait, se compose essentiellement d'un microscope dont l'oculaire et l'objectif sont indépendants, quoique placés à la distance convenable pour produire leur effet habituel. L'oculaire est monté sur un support invariable; l'objectif est fixé à l'une des branches d'un diapason, dont l'autre branche porte un contre-poids. Le plan des deux branches du diapason est perpendiculaire à l'axe optique du microscope, de telle sorte que le diapason ne peut vibrer sans entraîner l'objectif dans son mouvement suivant une direction perpendiculaire à l'arc du microscope. Il résulte de là que tout point placé à une distance convenable de l'objectif pour être vu nettement, fournit au foyer de l'oculaire une image qui oscille rapidement dès que l'on fait vibrer le diapason, et se transforme ainsi en une ligne droite perpendiculaire aux branches du diapason.

Prenons maintenant le corps vibrant que nous voulons étudier, rendons un de ses points brillant par un de ces moyens simples qu'il est toujours facile d'imaginer dans chaque cas particulier, et dont l'emploi ne produit pas d'altération sensible dans le corps. Plaçons ce corps vis-à-vis du microscope, de façon que le point en question soit nettement visible, et orientons les deux appareils de telle sorte que l'oscillation du point brillant se fasse dans un plan parallèle à l'objectif et perpendiculaire à la ligne suivant laquelle l'objectif vibre; et alors l'image vue dans le microscope

sera animée à la fois de deux mouvements perpendiculaires entre eux. La composition de ces deux mouvements fournira l'une des courbes lumineuses étudiées ci-dessus, et permettra de se rendre exactement compte du mouvement dont le corps vibrant est animé.

Cet appareil permet d'étalonner avec une haute précision un diapason sur un type donné. En effet le diapason étant préalablement accordé à l'aide de l'œil sur le diapason étalon, on n'a qu'à étudier à l'aide de ce même comparateur les vibrations du diapason que l'on veut étalonner, on aperçoit alors la figure optique indicatrice de l'unisson : si l'accord est irréprochable la figure est immobile, s'il ne l'est pas la figure éprouve ses transformations habituelles et indique par cela même la quantité dont l'unisson est altéré.

Ce procédé n'a pas été un des moindres auxiliaires dans l'établissement du *diapason normal*. Il était en effet indispensable de répandre rapidement dans le monde musical des diapasons officiels dont l'exactitude fut garantie par une vérification sérieuse et un poinçonnage. Cette vérification s'effectue aujourd'hui par la méthode optique à l'aide du comparateur et elle est aussi sûre que rapide.

Le comparateur peut s'appliquer à l'étude des cordes vibrantes. Il suffit en effet pour produire un point lumineux sur la corde, de l'éclairer au moyen d'un faisceau très-étroit de lumière formant un plan lumineux perpendiculaire à la corde. Le point situé dans le plan exécute son oscillation dans ce plan même, et ne cesse pas d'être éclairé; on peut donc à l'aide du comparateur en étudier le mouvement.

La courbe ainsi obtenue n'est jamais simple, elle est toujours accompagnée de dentelures plus ou moins multipliées qui indiquent le mélange de sons harmo-

niques avec le son fondamental de la corde. Le défaut de justesse de ces harmoniques se manifeste par un mouvement qui transporte ces dentelures le long de la courbe principale. On peut donc reconnaître ainsi les défauts d'homogénéité de la corde et même en apprécier jusqu'à un certain point la distribution, si l'on a soin de constater l'inégale altération produite dans la justesse des divers harmoniques.

L'étude des sons propagés par l'air peut se faire aussi par les moyens optiques : il suffit en effet de recueillir les vibrations sur une membrane à laquelle on a fixé préalablement une petite perle brillante. En étudiant, à l'aide du comparateur optique, le mouvement de cette petite perle, on a des indications plus ou moins complètes sur la nature des vibrations aériennes qui l'ont produit.

Je m'arrête, messieurs, je craindrais d'abuser plus longtemps de votre bienveillante attention. Permettez-moi cependant d'exprimer en terminant l'impression sous laquelle je désirerais vous laisser. Je ne puis douter de l'intérêt excité par la partie expérimentale de cette leçon, mais ces expériences quelques brillantes qu'elles puissent être ne constitueraient qu'un amusement frivole, si elles n'ouvraient un champ nouveau aux recherches acoustiques. Je désire vivement que vous emportiez cette idée, qu'il y a là une méthode féconde, un moyen d'investigations qui ne restera pas sans applications utiles surtout entre des mains plus habiles que les miennes. Si j'ai été assez heureux pour vous pénétrer de cette pensée, j'aurai la satisfaction d'avoir recueilli tout le fruit que je désirais tirer de cette leçon où l'attrait des expériences n'a peut-être pas réussi à masquer l'insuffisance du professeur.

---

# RECHERCHES

# SUR LA NITRIFICATION

ET

## CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

## SUR LE ROLE DES NITRATES DANS LA VÉGÉTATION

LEÇON PROFESSÉE LE 15 MARS 1861

A LA SOCIÉTÉ CHIMIQUE DE PARIS

PAR M. S. CLOËZ

MEMBRE DE LA SOCIÉTÉ CHIMIQUE DE PARIS

I

MESSIEURS,

Je me propose de vous entretenir sommairement dans cette séance des principaux faits relatifs à la théorie de la nitrification, et de vous présenter ensuite quelques réflexions sur la source de l'azote des plantes, ou, pour mieux dire, sur le rôle des nitrates dans la végétation.

Le sujet envisagé à ce double point de vue est vaste et intéressant; je n'ai certes pas la prétention de le traiter d'une manière complète, mais j'essayerai au moins de vous donner une idée des points les plus importants en insistant particulièrement sur ceux qui ont été l'objet de mes recherches.

Je dois vous expliquer d'abord comment j'ai été amené à traiter en quelque sorte simultanément, deux questions parfaitement distinctes en elles-mêmes, à savoir : la nitrification et le rôle des nitrates dans la végétation; c'est que ces deux questions sont pour moi intimement liées; mes idées sur la seconde ayant servi de point de départ à mes recherches sur la première, il est tout naturel que je vous les expose pour ainsi dire en même temps.

L'origine de l'azote des plantes, ou la forme sous laquelle cet élément s'assimile, a été, depuis un quart

de siècle, l'objet de recherches nombreuses et variées, dont les résultats n'ont malheureusement pas toujours été bien concordants ; on a pu admettre, en effet, que les végétaux absorbent directement l'azote libre de l'air, mais on a cru aussi pouvoir considérer l'ammoniaque et les sels ammoniacaux, comme l'unique forme sous laquelle l'azote pénètre dans l'organisme des plantes.

On connaissait bien, à la vérité, les merveilleux effets des nitrates sur la végétation, mais on les expliquait en les rapportant à l'ammoniaque qu'ils fournissent en se réduisant dans la profondeur du sol, au contact des matières organiques.

La théorie de l'assimilation directe de l'azote de l'air par les plantes, admise encore aujourd'hui par quelques personnes, a eu pendant un certain temps de nombreux partisans ; abandonnée par le savant agronome, dont les travaux ont le plus contribué à la mettre en vogue, cette théorie fut reprise en sous-œuvre, et soutenue énergiquement par un nouveau champion, armé de volumineux documents, résultant d'expériences nombreuses, poursuivies pendant longtemps.

L'incertitude des opinions émises sur cette question fondamentale exigeait de nouvelles recherches ; elles ont été entreprises, si j'ose dire contradictoirement, par les savants qui étaient en désaccord ; les résultats des expériences ont été exposés devant l'Académie des sciences ou soumis à son jugement ; on a pu tirer de ces nouveaux travaux quelque lumière, mais le sujet ne s'est pas encore trouvé suffisamment éclairci, et le doute est resté dans beaucoup d'esprits.

En 1854, une commission académique composée de MM. Chevreul, Dumas, Regnault, Payen, Decaisne et Peligot, résolut de vérifier les résultats annoncés par le

partisan de l'assimilation directe, et elle l'invita à établir ses appareils dans une dépendance du Muséum.

L'expérience devant durer plusieurs mois et exiger des soins minutieux et pour ainsi dire continus, je fus chargé d'aider l'auteur, et de le suppléer même au besoin.

Cette circonstance toute fortuite me rendit naturellement témoin des incidents survenus dans le cours de l'expérience, que je dus suivre jusqu'au bout, et je pus ainsi parfaitement me rendre compte des grandes difficultés inhérentes au sujet.

Il n'est pas nécessaire à notre objet de vous représenter la disposition des appareils ; elle est assez généralement connue ; il me suffira de vous rappeler qu'elle a été figurée par l'auteur des recherches sur la végétation, et qu'elle a été en outre consignée dans le savant rapport académique de M. Chevreul, avec les modifications prescrites par la Commission, pour empêcher l'arrivée accidentelle de l'ammoniaque ou des sels ammoniacaux contenus dans l'air atmosphérique continuellement renouvelé et dans l'eau distillée servant à l'arrosage.

L'expérience terminée, on a pu constater dans la récolte une quantité d'azote bien supérieure à celle qui était contenue primitivement dans les graines semées ; il y avait eu gain en azote, on ne pouvait pas le nier.

Mais quelle était l'origine de l'excès de l'élément assimilé ? Évidemment elle devait être attribuée à l'air atmosphérique ; ici encore tout le monde était d'accord ; le doute se faisait jour seulement, quand on se demandait sous quelle forme cet azote avait été absorbé ; avait-il été pris simplement à l'état d'azote libre, tel qu'il existe dans l'air atmosphérique, ou bien à l'état de composé binaire, acide nitrique ou ammoniaque,

formé aux dépens des éléments de l'air dans les conditions de l'expérience ?

Guidé par l'idée préconçue que les nitrates sont l'unique source de l'azote des plantes, j'ai pensé dès le principe que l'expérience instituée pouvait donner lieu à une production d'acide nitrique, par la combinaison directe de l'azote avec l'oxygène de l'air ; ne réunissait-elle pas, en effet, les conditions principales de la nitrification, c'est-à-dire une matière alcaline, un corps poreux calciné, de l'humidité et de plus une certaine quantité de matière organique en décomposition ?

Il m'a semblé encore que les précautions minutieuses prises pour empêcher l'arrivée de l'ammoniaque de l'air dans les appareils ne suffisaient pas pour arrêter les vapeurs nitreuses, un simple flacon laveur à moitié rempli d'une solution de bicarbonate de soude ne pouvait pas absorber complétement les composés nitreux de l'air, qui traversait le liquide sous la forme de grosses bulles, et avec une vitesse d'environ cent litres par heure.

Cette seconde cause d'incertitude eût été facile à éviter dans de nouvelles expériences ; mais il n'en était pas de même de la première; il était donc tout à fait indispensable de faire des expériences comparatives et rigoureuses pour se former une idée de son degré d'influence.

J'ai consacré à ce sujet difficile plusieurs années de mon temps; des résultats contradictoires m'ont quelquefois embarrassé, mais j'ai fini par surmonter les obstacles, et la question de la nitrification me paraît aujourd'hui complétement élucidée.

Les anciens travaux relatifs au sujet que nous traitons renferment un grand nombre d'observations exactes tombées dans l'oubli; il est nécessaire de les rappeler; mais il est surtout juste de rendre à leurs

auteurs tout le mérite qui leur revient. C'est ce que nous allons essayer de faire dans une revue rapide des diverses opinions émises sur la théorie de la nitrification.

## II

Il est difficile aujourd'hui de savoir positivement si le *Nitrum* de Pline et des anciens était différent du *Natrum* ou carbonate de soude des modernes. On tirait jadis ce dernier sel des lacs de l'Égypte, des carrières et de la terre des plaines de la Perse et de l'Inde, et il est bon de remarquer que les lieux où on le trouvait, à part les lacs salés, sont précisément ceux où l'on récolte encore de nos jours une grande quantité de salpêtre.

La ressemblance des mots *Nitrum* et *Natrum* a pu être l'origine de la confusion des choses qu'ils désignent. Cette ressemblance a suffi pour faire prendre le change, de sorte qu'on a pu croire que le salpêtre est comme le *natrum* un sel minéral, naturel dans l'Inde. Le fait est d'ailleurs bien possible, et la découverte du nitrate de soude naturel au Pérou montre encore que l'ancienne croyance n'était ni absurde ni complétement dénuée de fondement, qu'elle pouvait être en réalité le résultat vrai de l'observation.

Quoi qu'il en soit sur ce point, comme nous ne nous sommes pas proposé de faire l'histoire du nitre des anciens, nous ne discuterons pas cette question spéciale, fort intéressante au moyen âge, mais presque indifférente aujourd'hui.

Les anciens alchimistes pensaient que le nitre prend

sa source dans l'air ; il s'y trouve, suivant eux, sous la forme de principes ou d'œufs, et le sol n'est autre chose que la matrice où se fait l'incubation, où a lieu le développement du germe, et finalement la naissance du sel parfait.

L'air a de tout temps joué un grand rôle dans la théorie de la nitrification. Son influence n'avait pas échappé aux alchimistes habitués à comparer les opérations alchimiques aux fonctions du corps, ils assimilèrent la formation du nitre à un acte de génération; et en attribuant à l'air l'origine des germes, ils se trouvaient, par hasard, bien près de la vérité. Il leur a manqué de connaître la composition de ce prétendu élément.

Quelques anciens chimistes, à l'exemple de Mayow, admettaient dans l'air la présence d'un esprit nitro-aérien, ou espèce d'acide nitreux; les matières absorbantes du sol attiraient cet acide, et il en résultait un nitre plus ou moins parfait.

Enfin, une troisième variété de partisans du nitre aérien, parmi lesquels il faut compter le chancelier Bacon, considéraient ce sel comme tout formé dans l'atmosphère, où la pluie et la rosée le prenaient et le précipitaient à la surface du sol, pour servir aux besoins de la végétation.

En résumé, l'idée du nitre aérien, telle que Mayow et les anciens chimistes la concevaient, n'a rien d'absurde; je dis plus, elle était très-raisonnable, à cette époque reculée où la science suivait fort peu les règles de l'observation et de l'expérience.

# III

Un des chimistes les plus féconds du dix-septième siècle, Glauber, a le premier traité méthodiquement de la nitrification; il est le premier qui se soit formé véritablement un système sur la génération de ce sel.

Tout en reconnaissant l'influence de l'air sur la production du salpêtre, Glauber rejette l'opinion des anciens alchimistes et des chimistes ses contemporains sur le nitre aérien. D'après lui, ce sel existe dans les trois règnes de la nature, c'est le *subjectum universale,* et il lui attribue trois origines différentes :

1° On le trouve tout formé dans les végétaux, et de là il passe dans les animaux qui s'en nourrissent, par les voies de la digestion.

2° Il se forme en quantité considérable, par la décomposition des matières végétales et animales.

3° Enfin, il existe naturellement dans le règne minéral, et on peut l'extraire des terres et des carrières, qui en contiennent en grande abondance.

Dominé par les idées alchimiques de l'époque, Glauber croyait à la conversion de tous les sels en salpêtre; ceux qui sont volatils subissent plus promptement cette conversion; les sels fixes, au contraire, sont plus difficiles à transformer, tels sont le sel marin, l'alun et le vitriol.

En avançant que les sels peuvent se changer en salpêtre, il ne faut pas croire, dit Glauber, qu'ils acquièrent cette propriété aussitôt après l'extraction et la calcination; ils ne deviennent un vrai salpêtre qu'après avoir été exposés un temps suffisant à l'air, après

en avoir attiré la vie et la flamme, qui leur donnent la faculté de détoner. Dans un autre endroit il ajoute : plus l'air touche immédiatement les sels, plus leur conversion en salpêtre est prompte. Et, en effet, nous voyons que les pierres dures ne se salpêtrent pas, tandis que la chaux, qui leur sert de joint, comme plus poreuse et plus accessible à l'air, acquiert bientôt cette propriété.

Il est à peine nécessaire de faire remarquer que tous les moyens indiqués par Glauber, pour la conversion de divers sels en salpêtre, comprennent, en outre de ces sels, des matières organiques d'origine animale, telles que l'urine, par exemple, ou quelquefois même des eaux mères des salpêtriers, dans lesquelles il reste toujours une portion plus ou moins grande de nitre à base de chaux ou de magnésie, quand ces eaux mères n'ont pas été additionnées d'une quantité suffisante de lessive de cendres.

L'enthousiasme de Glauber, ou peut-être le désir d'acquérir de la célébrité, le porte souvent au delà du vrai; il est visible, à la lecture de ses écrits, qu'il suppose des expériences qu'il n'a point faites. Tantôt il affecte une réserve discrète, en tenant cachées les découvertes utiles dont il peut tirer profit, ou dont il veut faire part à ses amis; tantôt il laisse voir la haute opinion qu'il a de son propre mérite, en exposant ses principes avec un ton de jactance et de forfanterie presque ridicule.

Glauber a fait, sur le nitre, une multitude d'observations neuves et utiles; malheureusement, elles se trouvent comme perdues au milieu d'un fatras obscur de rêveries mystiques et d'assertions gratuites. Parmi les méthodes qu'il a données pour obtenir du salpêtre, quelques-unes ont été vérifiées et elles ont servi de base à l'établissement des nitrières artificielles, communes en Europe, dans le cours du dix-huitième siècle.

## IV

Stahl s'est beaucoup occupé aussi de la question du nitre. Il a fait paraître, en 1698, une dissertation sur ce sujet, où il est d'une opinion entièrement différente de celle de Glauber. Il admet que ce sel, ou plutôt son acide constitutif, est une modification de l'acide universel, une combinaison de l'acide vitriolique, avec le principe inflammable : « il s'engendre par la combinaison de la substance ignée de la lumière ou phlogistique, avec l'acide primitif (*acidum primigenium*), atténué lui-même par la putréfaction. »

D'après Stahl, l'air favorise la nitrification, par cela seul qu'il détermine la putréfaction ; il explique comment la matière inflammable répandue dans l'air, contribue, avec l'acide aérien universel, à la formation de l'acide nitreux. Suivant lui, *les altérations qu'éprouve l'alcali volatil exposé à l'air libre, méritent bien d'être étudiées, relativement à la production du même acide.*

Stahl n'admet pas l'existence du nitre volatil de l'air, cependant, il ne conteste pas que, dans les lieux bas et humides, favorables à la production du nitre, l'air ne puisse contenir l'acide du sel, ou pur ou lié avec quelques matières volatiles. Il se pourrait encore que le nitre, déjà fixé dans la terre, soit une espèce d'aimant qui attire ces parties volatiles.

L'idée d'un seul acide primitif, considéré comme le principe et l'origine des autres acides, appartient à Becher. Stahl n'a fait que développer cette idée et en vulgariser en quelque sorte la conséquence, c'est-

à-dire la conversion des acides les uns dans les autres, et spécialement celle de l'acide vitriolique en acide nitreux.

Ce système de transmutation a dominé pendant longtemps, et il n'a été abandonné définitivement que vers la fin du dernier siècle.

Nous avons vu que Glauber attribuait trois origines au nitre, savoir : l'origine végétale, l'origine animale, et l'origine minérale. De ces trois sources, Lémery le fils n'en admet qu'une, la première.

Dans deux mémoires présentés à l'Académie des sciences, Lémery cherche à établir que le nitre est toujours le produit de la végétation, qu'il passe des plantes dans les animaux par la nutrition, et que le sel qu'on retire par lixiviation des terres salpêtrées, provient des substances végétales et animales qui s'y trouvaient mélangées, et dans lesquelles le nitre existait tout formé, mais à l'état latent, ayant besoin d'être dégagé par la fermentation et la putréfaction.

L'idée du nitre aérien, abandonnée déjà par Glauber et Stahl, et combattue depuis peu par Mariotte, trouva, dans Lémery, un rude adversaire. Ce chimiste cherche à prouver, par le raisonnement et par les faits, qu'il faut abandonner complétement l'opinion ancienne, suivant laquelle l'atmosphère est le magasin universel du nitre, tandis que le sol renferme des espèces d'aimant propres à l'attirer et à le fixer. L'action de l'air seul est insuffisante pour produire du nitre, et les terres exposées à l'air ne se salpêtrent pas d'elles-mêmes, quand elles sont isolées et qu'elles ne renferment aucune substance végétale ni animale.

## V

Les diverses recherches des chimistes sur le salpêtre avaient montré la possibilité de produire artificiellement ce sel; plusieurs souverains en Europe mirent à profit les connaissances acquises et ils cherchèrent à assurer à leurs États une récolte de salpêtre suffisante à leurs besoins.

Le Conseil de guerre de Suède publia en 1747 une instruction détaillée et très-remarquable sur l'établissement des nitrières artificielles; il invita les particuliers à se livrer à ce genre d'entreprises, et il promit des encouragements à ceux qui monteraient des ateliers de fabrication.

Les moyens prescrits consistent à mélanger dans des proportions convenables des matières tirées des trois règnes de la nature, en choisissant celles qui ont été reconnues les plus propres à la génération du salpêtre. On recommande de maintenir le mélange à un juste degré d'humidité, de l'exposer à une chaleur modérée et de faciliter un libre accès à l'air; c'est dans ces conditions que la nature produit le salpêtre; il est avantageux de ne pas s'en écarter, en observant d'ailleurs quelques autres circonstances longuement détaillées dans l'instruction.

Un an après que le Conseil de guerre de Suède eut publié son instruction, c'est-à-dire en 1748, le roi de Prusse chercha à augmenter dans ses États la production du nitre, et il prescrivit à cet effet la construction de murailles épaisses, formées de terre, de paille, et d'autres végétaux de toutes sortes.

La question de la production artificielle du nitre était très-importante sous plusieurs rapports, l'académie de Berlin la mit au concours, et le prix proposé fut remporté par Pietsch en 1749.

Pietsch admet dans le nitre cru un acide particulier, qui n'est autre chose que l'acide vitriolique affaibli par le *phlogiston*, ou principe inflammable des sels urineux, produit par la putréfaction des végétaux et principalement des animaux. Cette théorie est, à peu de chose près, celle de Becher et de Stahl, telle que nous l'avons rapportée; comme ces chimistes, Pietsch croit à la transmutation de l'acide vitriolique en acide nitreux, et, à l'appui de son opinion, il cite plusieurs expériences, dont l'une entre autres consiste à exposer dans un vase, au contact de l'air, de la terre calcaire saturée avec de l'acide vitriolique et à verser de temps en temps par-dessus de l'urine ou quelque autre matière propre à donner de l'*alcali volatil* par la putréfaction; on obtient ainsi avec le temps une terre très-riche en salpêtre.

Les circonstances que Pietsch considère comme les plus propres à favoriser la production du salpêtre méritent d'être rapportées, ce sont :

1° La présence d'une terre calcaire, qui fixe l'acide du nitre et qui lui fournisse une base;

2° La grande porosité de la terre, qui laisse un libre passage à l'air;

3° La putréfaction des matières végétales ou animales et l'*émanation de l'alcali volatil qui s'en dégage;*

4° Enfin, une certaine proportion de chaleur et d'humidité.

Ces principes généraux applicables à l'établissement des nitrières artificielles sont d'une précision remarquable; les progrès de la science réalisés dans l'espace

de plus d'un siècle, n'auraient rien à y ajouter, rien à en retrancher.

Pietsch les a empruntés en partie à ses devanciers ; mais s'il ne les a pas énoncés le premier, il a le mérite au moins de les avoir réunis, et d'avoir résumé en quelques lignes les conditions nécessaires de la nitrification.

## VI

La fouille pratiquée par les salpêtriers privilégiés pour la recherche du nitre chez les particuliers avait suscité des plaintes nombreuses et bien fondées ; elle était vexatoire au suprême degré, et surtout fort onéreuse pour les populations ; on chercha par tous les moyens de la supprimer.

L'académie des sciences, arts et belles-lettres de Besançon, à l'exemple de celle de Berlin, avait déjà proposé dans ce but, pour sujet de prix en 1766, de déterminer la manière la moins onéreuse de fabriquer du salpêtre en Franche-Comté.

A peu près à la même époque, la génération et la fabrication du salpêtre furent l'objet des travaux de plusieurs membres de la Société économique de Berne ; El. Bertrand, Grunner, Neuhaus, etc., publièrent chacun un mémoire ou des observations, qui ne présentent à la vérité rien d'absolument neuf et qu'on ne trouve déjà plus dans Glauber, dans la dissertation de Pietsch, ou dans l'instruction suédoise, mais que l'on doit citer, pour montrer combien l'on se préoccupait alors à juste titre de la question de la nitrification.

En 1775, le contrôleur général des finances, Turgot,

réclama le concours de l'Académie des sciences, pour la rédaction d'un programme relatif à la *proposition d'un prix en faveur de celui qui aurait trouvé les moyens les plus prompts et les plus économiques de procurer en France une production et une récolte de salpêtre plus abondantes que celles qu'on obtenait alors, et surtout qui puissent dispenser des recherches que les salpêtriers avaient le droit de faire dans les maisons des particuliers.*

L'État avait pour but d'éveiller l'attention des savants et il espérait acquérir par leur concours des connaissances certaines sur les points qu'il soumettait à leurs investigations.

Pour faciliter les recherches des concurrents, les commissaires de l'Académie, Macquer, d'Arcy, Lavoisier, Sage et Baumé, publièrent le précieux *Recueil de mémoires et d'observations sur la formation et la génération du salpêtre.*

Les régisseurs des poudres ne voulurent point rester en arrière, ils firent preuve d'autant de zèle que les commissaires de l'Académie, en publiant en 1777 une espèce de résumé en forme d'instruction, comme celle du Conseil de guerre de Suède, sur la fabrication du salpêtre; cette publication, essentiellement pratique, a eu pour effet de vulgariser en quelque sorte les connaissances acquises sur la nitrification. L'instruction des régisseurs des poudres traitait aussi, mais d'une manière élémentaire et succincte, de la nature de l'acide nitreux. Lavoisier avait trouvé depuis peu le moyen de décomposer cet acide par l'analyse, en air nitreux et en air vital, et il avait pu le reproduire par la synthèse, en réunissant ses éléments constituants.

Le prix proposé par l'Académie devait être proclamé en 1778; mais le délai accordé était évidemment trop

court, relativement à l'importance du sujet et à la nature des expériences qu'il exigeait. On dut prolonger de quatre années le temps accordé primitivement aux concurrents, et la proclamation du prix fut différée jusqu'en 1782.

Les commissaires de l'Académie eurent à examiner soixante-six mémoires plus ou moins volumineux, plus ou moins dignes de fixer l'attention. Celui de MM. Thouvenel remporta le prix; il contient, disent les commissaires, une foule d'expériences d'un genre délicat et difficile, entreprises d'après des vues nouvelles et la plupart très-concluantes. MM. Thouvenel y donnent le moyen de former de l'acide nitreux pour ainsi dire de toutes pièces, et en employant des matériaux absolument étrangers à cet acide. Ces matériaux sont le gaz de la putréfaction et l'air atmosphérique.

Les faits exposés dans le mémoire de MM. Thouvenel ont beaucoup éclairé l'art de fabriquer le salpêtre, sans contribuer à augmenter notablement sa production. Sous le rapport économique, la question proposée est restée presque tout entière à résoudre; il fut seulement bien établi, comme on le savait du reste depuis longtemps, que le salpêtre ne peut pas se former sans le contact de l'air, et que la putréfaction des matières organiques d'origine végétale et animale favorise sa formation, en présence des matières alcalines absorbantes, et dans des conditions convenables de température et d'humidité. Quant au mode d'action du gaz putride mélangé à l'air atmosphérique, il resta inexpliqué; on n'eut pas l'idée de rapporter les effets produits à la présence de l'alcali volatil, dont Pietsch avait pourtant déjà indiqué précédemment l'influence.

Le concours eut pour effet immédiat de faire disparaître définitivement la vieille théorie de la conversion de l'acide vitriolique ou de l'acide marin en acide ni-

treux; les expériences faites par un grand nombre de concurrents, et par les commissaires de l'Académie eux-mêmes, démontrèrent clairement que cette transmutation est aussi chimérique, aussi impossible que celle des métaux les uns dans les autres. On constata de plus que les sels vitrioliques ou marins, employés en quantité un peu forte, sont plus nuisibles qu'utiles dans la fabrication du salpêtre.

On crut avoir pénétré le secret de la nature, et on considéra la nitrification comme un phénomène très-simple; tout l'art consistait à combiner les émanations produites par les corps en putréfaction avec l'air vital, ou *principe oxygine* de Lavoisier, et à fixer le produit de cette combinaison dans des terres calcaires poreuses.

Les mémoires présentés à l'Académie pour le prix du salpêtre contiennent quelques vérités disséminées parmi des idées absurdes et des faits mal observés, ou mal interprétés; on y trouve des observations bien faites, mais elles sont rares, et on ne peut en retirer quelque chose que par une critique sévère et éclairée.

## VII

Outre les mémoires couronnés, le volume publié par l'Académie en 1786 renferme les recherches de Clouet et Lavoisier sur des terres et des pierres naturellement salpêtrées, existant en France dans la craie des bords de la Seine, à la Roche-Guyon et à Mousseau, ainsi que dans le tufau du bassin de la Loire, dans la Touraine et dans la Saintonge.

Dans le même volume, se trouve mentionnée l'ex-

périence capitale de Cavendish, sur la synthèse de l'acide nitrique par la combinaison directe au moyen de l'étincelle électrique de la mofette atmosphérique avec l'air vital.

Cette expérience, devenue classique, consiste à mêler ensemble, dans un tube de verre, trois parties de mofette atmosphérique avec sept parties d'air vital, à renfermer le tout par de l'eau de chaux, et à tirer ensuite dans le mélange une série d'étincelles électriques; chaque étincelle diminue d'une petite quantité le volume du mélange gazeux, et en continuant un temps suffisant, on arrive à le faire absorber presque en totalité; l'eau de chaux n'est pas troublée dans cette expérience; mais il se forme du nitre à base terreuse.

Si au lieu d'eau de chaux on emploie une dissolution d'alcali fixe végétal, la diminution de volume est plus prompte, et par l'évaporation de la liqueur on obtient un véritable salpêtre.

Cavendish pense que les deux airs se combinent à un certain degré de chaleur, produit par le passage de l'étincelle électrique.

La composition trouvée par cette synthèse est presque exacte; exprimée en volume et rapportée à 100 parties elle est de :

| | |
|---|---|
| Azote | 30 |
| Oxygène | 70 |
| | 100 |

La composition exacte, exprimée de la même manière, donne :

| | |
|---|---|
| Azote | 28,57 |
| Oxygène | 71,43 |
| | 100,00 |

Il y a donc dans l'expérience de Cavendish un excès d'azote égal à 0,0143.

9

Lavoisier avait déterminé en 1784 la composition approchée de l'acide nitrique, en faisant détoner sous l'eau ou sous le mercure un mélange en proportions déterminées de nitre pur et de charbon.

Les expériences de Cavallo, répétées par Berthollet, avaient montré que dans ces conditions on obtient un mélange gazeux formé d'acide carbonique et de mofette atmosphérique, et de plus une certaine quantité d'alcali chargé d'air fixe.

En mesurant exactement le volume des gaz produits, y compris bien entendu la portion d'acide carbonique combinée avec l'alcali, et en admettant d'ailleurs que cet acide est formé de 28 parties de substance charbonneuse et de 72 parties de principe oxygène, et d'un autre côté, que l'acide nitrique est le résultat de la combinaison de 36 parties en poids d'air vital, et de 64 parties d'air nitreux, Lavoisier trouve pour la composition de l'acide nitrique exprimée en volume :

| | | |
|---|---|---|
| Air nitreux | Azote | 20,7044 |
| | Oxygène employé à former l'air nitreux | 43,3456 |
| Oxygène employé à transformer l'air nitreux en acide nitrique. | | 35,9500 |
| | Total | 100,0000 |

Ces expériences donnent une proportion d'azote beaucoup plus faible que celle qui avait été déterminée par Cavendish; l'erreur est en sens inverse, mais elle est plus forte. Nous avons vu que la composition de l'acide nitrique exige pour 100 volumes 28,57 d'azote et 71,43 d'oxygène, Lavoisier n'ayant trouvé également pour 100 volumes que 20,7044 d'azote et 79,2956 d'oxygène, l'erreur en moins en ce qui concerne l'azote est par conséquent de 0,07865, ou presque 8 pour 100.

La découverte de la composition de l'acide nitrique a jeté le plus grand jour sur la théorie de la nitrifica-

tion, le phlogistique n'eut plus à intervenir dans la production du phénomène, et les chimistes Stahliens finirent par abandonner leurs idées sur la conversion de l'acide vitriolique et de l'acide du sel marin en acide nitrique.

La question de la nitrification présentait cependant encore bien des points obscurs; on admettait, par exemple, que les matières organiques putrescibles sont indispensables à la formation du nitre, mais on ne pouvait pas expliquer la formation continue des nitrates dans des lieux où ces matières n'existent qu'en très-petite quantité, et où elles ne se renouvellent pas. Il est nécessaire de faire remarquer ici que l'idée du nitre aérien sous ses diverses formes avait été mise de côté; comment se rendre compte, dès lors, de la présence du nitre constatée par Clouet et Lavoisier dans des craies et dans de nombreux échantillons de tufau pris dans des cavernes, ou dans des carrières, à une grande distance des habitations; pouvait-on raisonnablement attribuer à la présence des matières animales, la grande quantité de nitrate qui existe et qui se reproduit continuellement à la surface du sol, dans les climats chauds, en Espagne, à Malte, en Chine, dans l'Inde, etc.?

## VIII

La théorie de la nitrification admise au commencement de notre siècle laissait beaucoup à désirer; au lieu de chercher à la compléter, Longchamp, dans un mémoire lu à l'Académie des sciences en 1823, en proposa une nouvelle, dans laquelle le rôle des ma-

tières animales est absolument seul. Se fondant sur des faits et sur des observations puisés dans le mémoire de Clouet et Lavoisier, sur les terres naturellement salpêtrées, dans le mémoire du duc de Larochefoucauld sur la génération du salpêtre dans la craie, et dans divers autres mémoires du concours de 1775, Longchamp émet les trois propositions suivantes, et il les développe longuement sans donner à l'appui aucune preuve positive :

« 1° Les nitrates se trouvent et se forment dans des matériaux ou dans des lieux qui ne contiennent ni matières végétales ni matières animales et qui n'ont jamais été soumis aux émanations des animaux. »

« 2° L'acide nitrique se forme en plein air dans des matériaux qui ne contiennent aucun vestige de matières animales ou végétales. »

« 3° Enfin, l'acide nitrique est formé exclusivement par les éléments de l'atmosphère. »

La conséquence de ces propositions, c'est que les matières animales, soit solides, soit liquides, ne concourent point par leur azote à la formation de l'acide nitrique. D'après Longchamp, la combinaison directe de l'azote avec l'oxygène de l'air dans les pierres poreuses contenant de la craie, se fait par l'intermède de l'eau, qui n'agit pas seulement comme véhicule des deux gaz, mais de plus comme produisant entre eux un commencement d'union.

Les expériences de Gay-Lussac et de Humboldt nous ont appris que l'air de l'eau est plus riche en oxygène que l'air atmosphérique; c'est un fait tout simple bien facile à expliquer. Mais un autre fait plus intéressant, au point de vue où s'est placé Longchamp, c'est que si l'on soumet une eau aérée à l'action de la chaleur, pour en retirer les gaz, et que l'on fractionne l'air recueilli, on trouve dans les premières portions beaucoup

moins d'oxygène que dans les dernières; ainsi la première fraction d'air obtenue contient 0,24 d'oxygène, tandis que la dernière en renferme près de 0,35, soit presque la quantité contenue dans le protoxyde d'azote, où il y en a 0,363.

L'originalité de la théorie de Longchamp réside essentiellement dans le mode d'action de l'eau sur l'oxygène et l'azote. Ce liquide tend d'abord à rendre les deux gaz plus intimement unis qu'ils ne le sont dans l'air atmosphérique, et lorsqu'une force quelconque vient se joindre à celle de l'eau, l'action moléculaire des gaz acquiert plus d'énergie, et il résulte enfin de ces forces réunies la formation d'une certaine quantité d'acide nitrique.

Maintenant, quel est le corps capable de seconder l'action de l'eau dans le phénomène de la nitrification? C'est tout simplement la chaux de la craie, ainsi que la petite quantité de base alcaline qui s'y trouve mélangée.

Ainsi, en résumé, le tufau, les terres meubles légères, la craie et tous les matériaux nitrifiables agissent d'abord physiquement par leur porosité, comme absorbant de l'eau et de l'air dont le renouvellement est indispensable; ils agissent ensuite chimiquement, comme présentant une base qui sollicite la formation de l'acide nitrique.

L'eau, de son côté, a aussi un double rôle; elle agit par son pouvoir dissolvant sur les éléments de l'air, puis elle produit entre eux un commencement de combinaison.

La théorie dont nous venons d'exposer les principes était en opposition avec l'instruction rédigée et publiée en 1820 par le Comité consultatif des poudres, dont Gay-Lussac faisait partie: elle n'a pas été admise, bien qu'elle ait son côté plausible; mais elle est trop

exclusive et en opposition manifeste avec les faits les mieux constatés, relativement à l'utilité des matières organiques dans le phénomène de la nitrification.

La théorie de Longchamp fut critiquée vivement par Gay-Lussac, qui adoptait l'opinion des anciens chimistes sur le rôle des matières animales, et qui affirmait, d'après les expériences positives de Thouvenel et les siennes propres, que le salpêtre ne se forme jamais sans le concours simultané de l'air humide et d'une substance organique azotée.

La discussion laissa la question indécise, comme auparavant; il était nécessaire de la soumettre à des expériences nouvelles : car s'il était démontré que les matières organiques favorisent la production du salpêtre dans les nitrières, autrement que par l'humidité qu'elles y maintiennent, il paraissait aussi bien établi que le nitre se forme et se renouvelle dans un grand nombre de localités, où les matières organiques se trouvent en très-faible quantité.

## IX

Nous avons vu précédemment que Stahl et surtout Pietsch attribuaient à l'alcali volatil ou ammoniaque un rôle actif dans la production du salpêtre.

Malgré son importance aujourd'hui bien établie, on avait négligé complétement l'influence de ce composé, jusqu'en 1838, à l'époque où M. Kuhlmann fit connaître une série de faits nouveaux et très-intéressants, où il prouva que l'ammoniaque à l'état libre, ou à l'état de carbonate, produit facilement de l'acide nitrique.

De là une nouvelle théorie de la nitrification plus complète et moins exclusive que les précédentes; d'après M. Kuhlmann, le rôle de l'ammoniaque dans la formation naturelle de l'acide nitrique peut être envisagé de deux manières différentes: en premier lieu, on peut admettre que ce composé provoque par sa réaction alcaline la combinaison des éléments constituants de l'acide nitrique, à savoir, l'oxygène et l'azote de l'air en dissolution dans l'eau, et qu'il sert de plus de véhicule pour transporter cet acide, dont il a déterminé la formation sur la base des carbonates de chaux et de magnésie, en échange de l'acide carbonique; de sorte que le carbonate d'ammoniaque formé se trouvant en présence de l'eau aérée, la production d'acide se renouvelle, et peut se continuer ainsi indéfiniment. Dans cette manière de voir, l'eau et l'ammoniaque jouent un rôle en quelque sorte analogue, l'une et l'autre servent d'intermédiaire ou de véhicule, la première en portant l'azote et l'oxygène de l'air sur l'ammoniaque, celle-ci en portant l'acide nitrique sur les carbonates insolubles.

La seconde hypothèse émise par M. Kuhlmann sur le rôle de l'ammoniaque dans la nitrification s'accorde mieux avec les faits; elle a été préférée et généralement admise par les chimistes, bien que, sous certains rapports, elle laisse encore beaucoup à désirer.

Dans cette hypothèse, l'azote de l'ammoniaque devient lui-même un des éléments de l'acide nitrique, par l'action de l'oxygène de l'air, sous l'influence de l'éponge de platine ou d'autres corps poreux, placés dans un milieu humide et à une température convenable.

Cette nouvelle interprétation du phénomène de la nitrification, fondée sur l'oxydation des éléments de l'ammoniaque et de leur transformation en eau et en

acide nitrique, est très-séduisante; elle repose sur des faits positifs, et elle doit être admise dans certains cas. Mais peut-on raisonnablement considérer l'ammoniaque comme l'unique cause de la nitrification? Nous ne le pensons pas : car dans le cas de l'affirmative, il faudrait prouver l'existence d'une grande quantité de matières azotées, pouvant fournir de l'ammoniaque, dans toutes les localités où la nitrification est très-active; et à défaut de ces matières azotées, il faudrait s'assurer que l'ammoniaque de l'air se condense de préférence dans ces localités, ou découvrir de nouvelles circonstances de production d'ammoniaque indépendantes de la présence des substances organiques. Ce dernier point s'est déjà, il est vrai, en partie réalisé dans les recherches de M. Kuhlmann, malheureusement les faits ne sont pas encore assez nombreux, ni assez concluants, pour qu'on puisse résoudre immédiatement la question.

## X

Nous avons terminé l'exposé des principales théories, relatives à la nitrification, émises depuis Glauber et les alchimistes, jusqu'au moment où nous avons institué nos expériences, en septembre 1854. Notre but, nous le répétons, a été de rechercher si dans les expériences sur la végétation que nous avons rappelées, l'azote de l'air a pu contribuer à la formation de l'acide nitrique, comme la théorie de Longchamp l'indique, comme l'expérience de Cavendish semble le prouver.

Disons tout de suite, que la question ne présente plus pour nous le moindre doute, elle est aujourd'hui

complétement résolue, et nos prévisions à son sujet se trouvent heureusement réalisées.

Toutes les théories de la nitrification, que nous avons passées en revue, sont incomplètes, parce qu'elles sont trop exclusives, c'est un point bien établi, chacune d'elles a du vrai; mais aucune ne tient compte de toutes les circonstances du phénomène.

A notre avis, la formation de l'acide nitrique doit être attribuée à des causes variées, dont quelques-unes même ont pu nous échapper; on aurait chance d'approcher de la vérité, en empruntant aux diverses théories les faits bien constatés sur lesquels elles sont fondées. C'est ce que nous allons essayer de faire, dans l'exposé qu'il nous reste à vous présenter, d'une théorie générale de la nitrification, telle que nous la concevons.

Nous assignons aux nitrates quatre origines distinctes; nous admettons que ces sels peuvent être produits :

1° Par la combinaison directe de l'azote avec l'oxygène sous diverses influences.

2° Par l'oxydation des composés nitreux oxygénés;

3° Par l'oxydation des éléments de l'ammoniaque;

4° Par l'oxydation de l'azote des matières organiques végétales et animales.

## XI

### Nitrification par l'union directe de l'azote avec l'oxygène.

L'oxydation directe de l'azote est une des sources les plus abondantes de l'acide nitrique, elle a lieu à la surface du sol, aussi bien que dans les régions élevées

de l'atmosphère; c'est là un point aujourd'hui parfaitement bien établi, que les anciens chimistes partisans du nitre aérien avaient en quelque sorte entrevu, mais qu'ils n'avaient pas pu démontrer, faute de connaître la nature de l'acide en question.

Rappelons d'abord l'expérience de Cavendish, dont nous avons déjà parlé, et qui fait date dans l'histoire de la nitrification. Cette expérience, vous le savez tous, consiste à faire passer une série d'étincelles électriques à travers un mélange d'azote et d'oxygène, en présence de l'eau de chaux ou d'une solution aqueuse de potasse. D'après Cavendish, la combinaison des deux gaz s'effectue sous l'influence de l'élévation de température produite par l'étincelle.

Pendant longtemps on a cru que la présence de l'eau ou des alcalis était indispensable pour la combinaison directe de l'azote avec l'oxygène; les expériences récentes et très-concluantes de MM. Frémy et Ed. Becquerel prouvent le contraire. Il suffit, pour s'en assurer, de faire passer dans le mélange des deux gaz, confiné dans un tube ou dans un ballon en verre traversés par des fils de platine, une suite d'étincelles électriques, au moyen d'une machine de Ruhmkoff, marchant à l'aide de quelques éléments de Bunsen, il se forme dans ces conditions de l'acide hyponitrique reconnaissable à sa couleur, à son odeur, et de plus, en cassant sous l'eau l'extrémité effilée du col du ballon, dont le contenu s'est fortement coloré en rouge, il y a une absorption immédiate, l'eau s'élève plus ou moins dans l'appareil et l'on constate facilement dans le liquide la présence de l'acide nitrique.

C'est ici le lieu de rappeler une expérience de l'illustre H. Davy à laquelle on n'a peut-être pas attaché toute l'importacce qu'elle mérite. Cette expérience consiste à placer dans le mélange gazeux d'oxygène et

d'azote, une spirale en fil de platine chauffée au rouge, par un courant de la pile, il se forme ainsi, tout comme dans l'expérience de Cavendish, de la vapeur nitreuse, qui se change en acide nitrique sous l'influence de l'humidité. Ce fait peu connu en France, à ce qu'il paraît, a été vérifié tout récemment et publié comme nouveau, on l'a interprété, il est vrai, tout autrement que Davy, car on a attribué à l'ozone des effets, qui pour nous sont dus évidemment à des composés nitreux oxygénés.

A l'époque de la découverte de la composition de l'eau, plusieurs chimistes, et Cavendish le premier, avaient observé que de la production artificielle de ce liquide, par la combustion de l'hydrogène ou air inflammable dans l'oxygène ou air vital, on obtenait tantôt de l'eau très-pure, tantôt de l'eau chargée d'un peu d'acide nitrique.

En 1783, Lavoisier et de la Place avaient formé ainsi de l'eau qui n'était pas sensiblement acide; mais comme le liquide obtenu nageait sur du mercure, ils pensèrent que la petite portion d'acide nitrique qu'il eût pu contenir, devait leur avoir échappé.

Dans une autre expérience très-authentique, faite à Paris en 1785, les mêmes auteurs obtinrent environ deux cents grammes (six onces) d'eau tellement chargée d'acide, qu'en la saturant par de l'alcali fixe végétal ou potasse, et en faisant évaporer, ils en retirèrent plus de trois grammes (soixante grains) de nitre bien détonant.

L'oxygène employé à la combustion contenait environ un huitième d'azote, malgré toutes les précautions prises pour avoir ce gaz à l'état de pureté. Il avait été extrait du précipité rouge, et pour lui enlever toute trace de vapeur acide, on l'avait mis en contact avec de l'eau pendant plus de quinze jours, et on l'a-

vait fait passer, avant de s'en servir, à travers deux flacons de Woulff, contenant de la potasse en dissolution, et ensuite à travers deux longs tubes de verre remplis d'alcali caustique concret, grossièrement concassé. Ces opérations, exécutées avec soin, ne permettent pas de supposer que l'acide trouvé dans l'eau préexistait dans l'oxygène employé ; il était impossible, dit Lavoisier, qu'il restât dans ce gaz le moindre vestige d'acidité, et il aurait plutôt été possible d'y soupçonner une qualité contraire.

D'ailleurs Cavendish a levé toute incertitude à cet égard, en employant de l'oxygène obtenu des plantes par la végétation, et il a également produit un peu d'acide nitrique.

Ces résultats me paraissent très-importants par leurs conséquences ; l'expérience qui les a fournis est facile à exécuter, je l'ai répétée plusieurs fois avec succès ; elle se fait actuellement sous vos yeux, et en attendant qu'elle soit terminée, je vous demande la permission de vous donner la description du procédé tel qu'il a été employé, et que nous avons dû ici un peu modifier.

La combustion se faisait dans un grand ballon de dix-sept à dix-huit litres de capacité, qu'on avait d'abord rempli d'oxygène et dans lequel on faisait arriver le gaz hydrogène par un tuyau très-fin ; ce qui se consommait des deux gaz, était remplacé au moyen de deux réservoirs qui en fournissaient de nouveau, mais avec cette circonstance, que l'oxygène arrivait avec une pression égale à celle de l'atmosphère, tandis que le gaz hydrogène était comprimé, en outre, par une colonne d'eau d'environ $0^{m},06$.

Il est évident que, puisque la combustion se fait aux dépens de l'oxygène et de l'hydrogène, l'azote ne brûlant pas, la portion de ce gaz contenue dans l'air vital

qui n'était originairement que d'un huitième, s'accumule insensiblement dans le ballon, de sorte qu'à un certain moment, les gaz sont en proportion convenable pour la formation de l'acide nitrique. Plus tard, on voit la flamme de l'hydrogène diminuer peu à peu d'intensité, et quand la quantité d'oxygène est insuffisante pour entretenir la combustion, la flamme s'éteint.

Dans notre expérience, l'hydrogène produit par l'action de l'acide chlorhydrique étendu sur le zinc, se purifie dans une éprouvette à cascade remplie de potasse concassée, et vient brûler, au moyen d'un tube de platine à orifice très-étroit, dans un grand ballon tritubulé, où il arrive un courant continu d'un mélange gazeux formé de vingt volumes d'azote et quatre-vingts d'oxygène.

Vous pouvez constater déjà la formation d'un acide par la coloration en rouge de la teinture bleue de tournesol, contenue dans le tube à boules, où passe l'excès de gaz qui n'a pas servi à la combustion, et, de plus, en prenant une portion de l'eau condensée dans le ballon, et la versant dans un mélange de sulfate de protoxyde de fer et d'acide sulfurique pur, nous constatons la coloration caractéristique produite par l'acide nitrique.

Maintenant, dans ces expériences, à quelle cause faut-il rapporter la combinaison des deux gaz ?

Cavendish pense qu'elle est produite par un certain degré de chaleur, résultant du passage de l'étincelle électrique ou de la combustion de l'hydrogène dans l'oxygène. Cette interprétation est admissible, sans doute, mais il n'est pas démontré qu'elle soit absolument vraie ; car, si cela était, on pourrait espérer d'arriver à former de l'acide nitrique en faisant passer de l'air sec ou humide sur diverses matières chauffées

convenablement et à des degrés divers. J'ai tenté dans ce sens l'expérience d'une foule de manières, sans obtenir de résultat satisfaisant. Peut-être finira-t-on par produire ainsi la combinaison ; mais il ne me paraît certes pas facile de réussir.

D'après Berzélius, en mêlant ensemble 1 vol. d'azote et 14 vol. d'hydrogène, et en faisant brûler ce mélange par petites portions dans une quantité d'oxygène suffisante pour oxyder les deux gaz, soit environ 10 vol., on obtient un mélange d'eau et d'acide nitrique.

Le célèbre chimiste suédois attribue, comme Cavendish, la formation de l'acide nitrique à la chaleur développée par la combustion ; mais il rappelle une circonstance dont je vous ai parlé, et à laquelle on n'avait pas encore alors fait attention dans tous les cas : c'est qu'il ne se forme de l'acide nitrique qu'en présence de l'eau ou d'un composé basique, avec lequel cet acide puisse se combiner, de sorte que ce n'est pas seulement l'élévation de température, mais aussi l'influence de l'eau, qui favorise la réaction.

Th. de Saussure a constaté aussi la production de l'acide nitrique par la combustion de l'hydrogène dans l'air.

D'après M. Chevreul, la combustion du charbon de bois au contact de l'air donne naissance à une petite quantité de vapeur nitreuse, reconnaissable à son odeur ; cette observation, déjà bien ancienne, se rattache à celles qui précèdent, elle doit recevoir la même interprétation.

M. Chevreul a reconnu, en outre, l'odeur des composés nitreux dans un escalier et dans un couloir éclairés la nuit par une lampe à huile, sembable à celle des anciens réverbères, mais de moindres dimensions ; les expériences entreprises pour vérifier le fait sont

encore inédites; mais la bienveillance accoutumée de M. Chevreul m'autorise à vous les communiquer.

Vous avez sous les yeux l'appareil employé pour condenser et recueillir l'eau et les composés solubles, produits par la combustion de l'huile au contact de l'air, dans une lampe ordinaire. Cet appareil se compose essentiellement d'une grande cornue en verre dont le fond a été enlevé et qu'on fixe en guise de chapiteau au-dessus de la lampe; au col de la cornue a été adaptée une allonge, suivie d'un long tube réfrigérant, puis d'un ballon récipient tubulé communiquant avec un gazomètre aspirateur à écoulement constant.

Vous pouvez vous assurer que l'eau condensée a une saveur aigrelette bien manifeste; cette saveur est due en partie à de l'acide carbonique, mais en partie aussi à de l'acide nitrique; et lorsque la combustion est incomplète, que la lampe est fumeuse par l'insuffisance du courant d'air, il se forme en outre un ou plusieurs autres acides qui n'ont pas encore été étudiés.

En ajoutant de la litharge pure, réduite en poudre fine, à l'eau condensée, agitant plusieurs fois le mélange de manière à saturer complétement l'acide, filtrant ensuite la liqueur et la soumettant à l'évaporation, on obtient à la fin des sels solubles de plomb, parmi lesquels le nitrate est facile à reconnaître, tant par sa forme cristalline que par les caractères propres à l'acide nitrique.

Voici, dans un verre de montre, le produit de l'évaporation d'un litre d'eau obtenu par le procédé qui vient d'être décrit; on peut voir à la loupe de petits cristaux octaédriques de nitrate de plomb, et, en projetant une portion du résidu dans un mélange de sulfate de protoxyde de fer et d'acide sulfurique pur, vous voyez immédiatement apparaître la couleur rouge caractéristique des nitrates.

L'acide nitrique se forme encore dans toutes les circonstances où l'on a cru reconnaître l'ozone ; c'est ainsi que M. Schœnbein, et après lui d'autres chimistes, ont pu constater la présence de cet acide dans de l'air qui a séjourné pendant quelque temps sur des fragments humides de phosphore, ou qui a été en contact avec d'autres matières de natures diverses et plus ou moins oxydables.

On connaît donc aujourd'hui une foule d'observations et d'expériences qui viennent se placer à la suite de celles de Cavendish et de Lavoisier, sur lesquelles nous avons cru devoir plus particulièrement insister.

En groupant toutes ces observations et en comparant leurs résultats, on peut admettre d'une manière générale que la formation de l'acide nitrique par l'union directe de l'azote avec l'oxygène est souvent corrélative d'un phénomène d'oxydation. Mes recherches sur la nitrification m'ont conduit à cette conséquence que je vous ai exposée au commencement de 1860, ainsi qu'on peut s'en assurer dans les procès-verbaux de nos séances (1). Depuis lors, cette interprétation a reçu une grande extension ; elle a été appliquée par M. Mil-

(1) Extrait du procès-verbal de la séance du 27 avril 1860. Présidence de M. Pasteur :

.... A la suite d'une communication de M. Bruestlein, M. Cloëz rappelle ses expériences sur la production d'acide azotique aux dépens des éléments de l'air circulant sur des corps poreux. *Cette production n'a pu être cosntatée par lui que dans le cas où les corps poreux contenaient une matière oxydable telle que du sulfure de fer.* Dans les expériences dont il vient d'être question, l'azote aurait pu passer à l'état d'azotate dont la recherche aurait présenté de l'intérêt.

A ce sujet, M. Cloëz cite les terrains tourbeux de la vallée de la Somme, qui ne sont fertiles que lorsqu'ils sont perméables à l'oxygène de l'air....

Les conditions de nitrification possible paraissent devoir être prises en considération pour préjuger de la fertilité du sol par lui-même ou par l'addition de divers matériaux.

lon à la plupart des cas de formation du salpêtre par l'oxydation de l'ammoniaque, en présence de corps qui s'oxydent eux-mêmes, en produisant un véritable phénomène d'entraînement.

## XII

Lorsque j'ai entrepris mes recherches sur la nitrification, la formation de l'acide nitrique par l'union directe de l'azote avec l'oxygène était généralement considérée comme une expérience curieuse de laboratoire, se réalisant très-rarement dans la nature, et ne contribuant que pour une faible part à la production du salpêtre naturel.

Mon but était d'avance bien déterminé : je voulais chercher si un courant d'air débarrassé autant que possible de vapeurs acides et ammoniacales peut fournir de l'acide nitrique et des nitrates en passant sur diverses substances poreuses préalablement lavées, calcinées et additionnées ensuite de substances basiques, telles que des carbonates alcalins ou alcalino-terreux, et de plus une certaine quantité d'eau.

Les soins les plus minutieux ont été apportés dans la disposition de mes appareils, surtout pour la purification de l'air, qui était pris par aspiration à un mètre environ au-dessus de la surface du sol.

D'abord, pour retenir les poussières et les corps légers de natures diverses que l'air tient en suspension, je le fais passer dans un tube solide en verre, contenant dans sa première moitié de l'amianthe humide préalablement calcinée, et dans la seconde partie de la ponce en petits fragments imbibés d'eau pure ; le gaz

arrive ensuite dans un tube laveur de forme particulière, rempli aux trois quarts avec une dissolution aqueuse de carbonate de potasse pur, obtenu en chauffant au rouge, dans un creuset en argent, du bicarbonate de potasse cristallisé. La purification de l'air, en ce qui concerne les vapeurs acides, se complète dans un troisième tube rempli de verre concassé, humecté avec une dissolution alcaline de potasse ; et pour les vapeurs ammoniacales, dans un quatrième tube tout semblable, et qui est plein de ponce sulfurique en gros fragments.

Ces quatre tubes sont fixés solidement sur un même support, chacun dans une position un peu inclinée ; celui qui contient la dissolution alcaline me paraît réaliser les conditions essentielles d'un bon système de lavage ; il est destiné à remplacer les tubes laveurs en ⊇ de Gay-Lussac, et même, dans certains cas, l'appareil à boules de Liebig. C'est un tube en verre de 20 à 25 millim. de diamètre sur $1^m,0$ à $1^m,30$ de long; chacune de ses extrémités est relevée sur une longueur de 10 cent. environ ; la première forme, avec la partie moyenne, un coude ou angle de 135 degrés environ ; la seconde porte, vers le milieu, un renflement sphérique soufflé à la lampe, et elle fait, avec la branche intermédiaire, un angle de 110 à 115 degrés.

L'air arrive dans l'appareil laveur au moyen d'un très-petit tube adapté à la première extrémité, et enfoncé jusqu'à la courbure ; il chemine ensuite lentement et bulle à bulle à travers le liquide, dans la branche intermédiaire qui porte supérieurement une série de renflements, et qui doit être plus ou moins inclinée à l'horizon, suivant la vitesse du courant, que l'on règle à volonté.

L'appareil fonctionne régulièrement quand cette vitesse ne dépasse pas 40 ou 50 litres par heure ; au delà

de ce terme, les bulles ne cheminent plus isolément dans le liquide absorbant; il est donc préférable de rester toujours au-dessous de cette limite, et de régler la vitesse de l'écoulement de l'eau contenue dans l'aspirateur, à raison de 30 à 35 litres par heure.

Avant d'aller plus loin, je dois vous faire remarquer une disposition très-simple, qui a pour but d'empêcher l'eau de pluie de pénétrer dans les appareils, et qui permet, en outre, de constater à volonté quelques-unes des qualités de l'air aspiré, telles que sa nature acide ou alcaline, sa propriété de colorer plus ou moins le réactif ioduro-amidonné.

Voici une petite cloche à gaz, recouverte extérieurement d'une couche épaisse de couleur noire; en la fixant dans une position renversée, au-dessus du tube d'arrivée de l'air, l'eau de pluie ne peut évidemment plus y entrer; maintenant, si l'on veut faire des observations sur la nature de l'air, il suffira de placer dans la cloche où la lumière n'a pas accès les bandes de papier réactif dont la coloration doit répondre à l'objet qu'on se propose.

Nous avons eu souvent recours à ce procédé pour faire des observations ozonométriques, qui ont aujourd'hui pour nous moins d'intérêt; le même moyen nous a conduit à reconnaître dans l'atmosphère, à certaines époques de l'année, la présence de l'acide nitrique libre en petite quantité.

Revenons maintenant à notre objet; nous considérons l'air qui a traversé notre système de purification comme débarrassé des poussières et de toutes les matières solides minérales ou organiques qu'il entraîne mécaniquement; il est privé du nitrate d'ammoniaque, ainsi que des vapeurs acides ou alcalines; mais il retient encore des traces des gaz hydrocarbonés peu solubles qui n'ont pas été absorbés.

Le fluide aérien arrive alors par la tubulure latérale inférieure dans des flacons de dix litres de capacité, qui contiennent les matières poreuses concassées en fragments gros comme des noisettes, et humectés préalablement avec de l'eau alcaline, ou trempés dans une bouillie claire de carbonate de chaux.

Le premier flacon où l'air pénètre contient de la porcelaine dégourdie de la manufacture de Sèvres.

Le second de la ponce calcinée.

Le troisième de la brique de Paris bien lavée.

Dans chacun de ces flacons, il y a dix grammes de carbonate de potasse.

Les trois flacons suivants, n[os] 4, 5 et 6, contiennent dans le même ordre les mêmes corps poreux que les trois premiers ; en place de carbonate alcalin, ils ont été imprégnés de carbonate de chaux pur, en les trempant séparément dans une bouillie claire de sel calcaire et les desséchant ensuite incomplétement, avant de les mettre dans les flacons.

Le septième flacon renferme de la craie nitrifiable de Meudon lavée et séchée.

Le huitième de la terre arable argileuse, lavée soigneusement et chauffée ensuite de manière à carboniser les matières organiques sans fritter l'argile.

Le neuvième la même terre arable lavée et séchée, mais non calcinée.

Enfin, le dixième de la ponce humide avec du carbonate de chaux pur, et de plus 10 grammes d'urée.

L'expérience dont je vous présente les résultats a duré huit mois ; elle a marché nuit et jour sans interruption, et il a passé dans l'appareil 160 000 litres d'air.

Nous pouvons constater dans le premier flacon, contenant la porcelaine dégourdie, la présence d'une très-faible quantité de nitre ; dans des essais antérieurs,

j'en ai toujours trouvé, mais en quantité si minime que je n'ose pas l'évaluer en poids.

Le flacon n° 2 à ponce alcaline ne donne rien.

La brique du flacon n° 3 lessivée donne une quantité notable de nitrate.

On a évaporé avant la séance une portion de l'eau de lavage, le résidu est encore très-alcalin, cela se conçoit, mais il contient assez de nitrate pour décolorer cette dissolution sulfurique d'indigo, et pour produire une coloration rouge très-intense dans le mélange de sulfate de fer et d'acide sulfurique.

Le flacon n° 4 ne donne rien.

Le n° 5 rien non plus.

Le n° 6 fournit du nitrate de chaux, mais la quantité n'équivaut pas à celle du nitrate de potasse trouvée dans le n° 3.

Le n° 7 contenant la craie donne un peu de nitrate.

Le n° 8 également.

Le n° 9, où se trouve la terre arable non calcinée, donne beaucoup plus de nitre que les précédents.

Enfin, dans le n° 10, où il y a de l'urée pure, de la ponce calcinée et du carbonate de chaux, il ne s'est rien fait.

Il résulte de ces expériences que la porosité seule ne suffit pas pour déterminer la production de l'acide nitrique aux dépens des éléments de l'air, même en présence de l'eau et des alcalis. La ponce et la brique sont également poreuses ; cependant, il n'y a pas de nitrate dans la première, lorsqu'il s'en trouve une quantité notable dans la seconde ; ce fait m'a d'abord beaucoup étonné ; j'avais pris la brique au sortir du four, elle avait été lavée avant d'être mise dans les flacons, et je crois pouvoir affirmer qu'elle ne contenait alors aucune trace de nitrate, ni de matière organique azotée pouvant en donner.

Le phénomène me paraissait difficile à expliquer, et je puis avouer qu'il m'a beaucoup embarrassé, jusqu'au moment où je me suis aperçu que les briques employées renfermaient une matière oxydable de nature minérale, probablement du sulfure de fer. J'appris qu'elles avaient été fabriquées avec de l'argile de Gentilly, et qu'on avait de plus ajouté à la pâte une certaine quantité de mâchefer.

J'admets aujourd'hui que l'oxydation de ces matières a déterminé par entraînement la formation d'acide nitrique, comme dans les nombreuses expériences anciennes et récentes que je vous ai rappelées.

Quelle conclusion tirer maintenant de tous ces faits, relativement au but que nous nous sommes proposé? La conclusion, la voici : c'est que dans les expériences faites pour démontrer l'assimilation directe de l'azote de l'air par les plantes, on n'a pas pu éviter la formation des nitrates, et il nous paraît tout naturel d'attribuer à ces sels l'excès d'azote trouvé. L'assimilation directe doit donc être rejetée: c'est du moins mon opinion, et j'ai cru devoir vous l'exprimer franchement.

## XIII

M. de Luca a fait des recherches intéressantes sur la nature de l'air pris au voisinage des serres ; il a trouvé dans cet air plus d'acide nitrique que dans l'air ordinaire, et il a attribué, je crois, cet excès au fait même de la végétation. Je ne puis pas admettre cette interprétation ; à mon avis, les végétaux tant qu'ils vivent ne produisent pas d'acide nitrique, au contraire, ils en

consomment; il peut y avoir dans l'air d'une serre plus d'acide nitrique, plus de vapeur d'eau, plus d'acide carbonique, que dans l'air ordinaire; mais la végétation n'y est pour rien; ces composés sont tous des produits immédiats ou médiats de l'oxydation des substances organiques employées comme engrais pour activer la végétation.

Mon opinion à cet égard est aujourd'hui bien arrêtée; elle est fondée sur une longue suite d'expériences, mais elle peut encore s'appuyer sur des observations anciennes dont une, entre autres, mérite d'être rapportée; la voici textuellement :

« Ceux qui prétendent que l'air contient le nitre et qu'il ne fait que le déposer dans les terres ont trouvé des partisans; il est indubitable que l'air peut contenir de l'acide nitreux, il peut se rencontrer des circonstances où cet acide soit élevé, ayant été formé avant que d'être fixé, ou les vapeurs nécessaires à sa composition se rencontrant isolées; c'est ce dont je me suis aperçu plus d'une fois sans le chercher. *J'ai senti autour des maisons de campagne où il y avait des matières en putréfaction dans les chaleurs de l'été une odeur qui avait beaucoup de rapport à celle qui frappe lorsqu'on entre dans le laboratoire d'un distillateur d'eau-forte, dont les galères travaillent.* Il faut être un peu accoutumé à cette odeur pour la reconnaître subitement; ce que j'avance pourrait paraître ridicule, mais peut-être ne suis-je pas le seul à qui le hasard ait procuré cette observation.

« Si cet acide isolé rencontre quelques matières avec lesquelles il puisse contracter union, il se fixe, et bientôt l'air en est dépourvu..... »

Ce passage est tiré du mémoire qui a partagé le second prix du salpêtre. Les auteurs sont M. Chevrand, inspecteur des poudres et salpêtres dans les anciennes

provinces de Franche-Comté et de Bresse, et Gavinet, commissaire des poudres et salpêtres à Besançon.

Il est à remarquer qu'à l'époque du concours, la doctrine de l'acide nitrique aérien n'était pas en vogue, elle comptait seulement quelques partisans timides, qui osaient à peine avouer leur opinion.

La présence de l'acide nitrique libre dans l'air, quelle qu'en soit d'ailleurs l'origine, est incontestable; mais elle ne paraît pas constante; on l'observe principalement au commencement et vers la fin de la saison froide : pendant les chaleurs de l'été, l'atmosphère renferme ordinairement du carbonate d'ammoniaque en excès. On comprend dès lors qu'il ne s'y trouve plus d'acide libre.

La quantité des composés nitreux oxygénés libres contenus dans l'air est toujours très-minime; il m'a été jusqu'ici impossible de la doser exactement, même en opérant sur un volume d'air considérable.

Pour reconnaître simplement ces acides, on peut employer plusieurs moyens; un des plus expéditifs consiste à puiser l'air par aspiration à un mètre environ de la surface du sol, et à le faire passer à travers un tube de verre dans lequel on place une petite bande de papier bleu de tournesol à l'abri de la lumière.

On peut aussi faire passer l'air à travers une dissolution aqueuse de tournesol très-sensible, et qui est contenue dans un tube laveur préservé des rayons lumineux.

Lorsque l'air est acide, la coloration rouge caractérisant les acides énergiques se manifeste après un temps plus ou moins long; cette coloration, il est à peine nécessaire de le faire remarquer, se distingue par sa nuance de celle qui est produite par l'acide carbonique libre, et elle persiste après que le liquide a été chauffé jusqu'à l'ébullition. La nature de l'acide

qui produit le changement de couleur se reconnaît par une expérience complémentaire, en faisant passer, toujours par aspiration, 15 à 20 mètres cubes d'air dans une solution titrée de carbonate de potasse pur. Ordinairement la solution perd une partie de son alcalinité, on constate dans la liqueur la présence du nitrate de potasse en quantité notable, on y trouve des traces de chlorure, mais elle ne contient pas de sulfate.

Le nitrate de potasse est dû en partie à l'acide nitrique libre, mais il peut être attribué en partie aussi à la décomposition du nitrate d'ammoniaque contenu dans l'air.

Pour reconnaître la part qui revient à chacune de ces sources, on fait arriver l'air, à sa sortie du tube à potasse, dans un second tube semblable contenant une quantité déterminée d'acide sulfurique dilué; on trouve généralement dans ce tube un peu de sulfate d'ammoniaque.

L'emploi du papier ioduro-amidonné proposé par Schœnbein pour reconnaître l'ozone doit être rejeté, quand il s'agit de constater la présence des composés nitreux ; c'est cependant un réactif plus sensible que le papier de tournesol à l'action de ces corps, car de l'air additionné de 0,00005 de son volume de vapeur nitreuse colore pour ainsi dire instantanément le réactif ozonométrique, dans des conditions où le papier bleu de tournesol n'éprouve aucune modification. Malgré cette exquise sensibilité, il est impossible de l'utiliser, parce qu'il se colore de la même manière, sous des influences diverses, en dehors de la présence de l'acide nitrique.

L'existence bien constatée de l'acide nitrique libre dans l'atmosphère, rend compte de la présence de l'ammoniaque dans certains échantillons de rouille, et de son absence à peu près complète dans d'autres ; il

est très-probable que l'ammoniaque existant dans l'oxyde de fer formé à l'air libre, est le résultat de la combinaison de l'azote provenant de la réduction de l'acide nitrique avec l'hydrogène, produit simultanément par la décomposition de l'eau. S'il en est ainsi, on conçoit que la rouille formée dans de l'air humide, débarrassée de vapeurs acides, ne doit pas contenir autant d'ammoniaque que celle qui se produit dans des circonstances opposées.

La formation de la patine sur les cloches et sur les statues de bronze non recouvertes de vernis est due en grande partie encore à l'acide nitrique libre; l'examen d'une couleur vert sale recueillie sur une cloche exposée aux intempéries de l'air depuis 1793, m'a conduit à y reconnaître la présence certaine de l'acide nitrique.

Les conséquences résultant de l'existence des composés nitreux libres dans l'atmosphère sont très-importantes pour l'agriculture; le chaulage superficiel et le marnage sont des pratiques agricoles qui ont principalement pour effet de fixer l'acide nitrique nécessaire à la végétation; l'opération de l'écobuage avec combustion, préconisée par le marquis de Turbilly, et exécutée par lui avec un grand succès, présente le même avantage, par les carbonates alcalins provenant de la combustion plus ou moins complète des végétaux enlevés avec la partie superficielle du sol. La théorie de l'écobuage, donnée récemment par M. Chevreul, comprend les points les plus importants de cette pratique agricole, un peu trop délaissée aujourd'hui; le rôle des carbonates alcalins m'a semblé pouvoir entrer aussi en ligne de compte, et ce motif seul m'a déterminé à vous en parler.

L'acide nitrique libre de l'air ne provient pas exclusivement de l'union directe de l'azote avec l'oxygène,

il se forme encore par l'oxydation de l'ammoniaque, et probablement aussi par les autres modes de nitrification qu'il me reste à vous exposer.

## XIV

### Nitrification par l'oxydation des composés nitreux.

Nous mentionnons cette source d'acide nitrique pour mémoire; on sait que les composés nitreux oxygénés comprenant le protoxyde et le bioxyde d'azote, les acides nitreux et hyponitrique, se changent facilement en acide nitrique dans des conditions déterminées et avec l'intervention de l'eau; mais dans la nature, il est difficile de constater la transformation; cette cause de la nitrification se trouve confondue avec la précédente, et il est pour ainsi dire impossible de les distinguer.

## XV

### Nitrification par l'oxydation de l'ammoniaque.

L'influence de l'ammoniaque dans le phénomène de la nitrification signalée par Stahl, et plus explicitement encore par Pietsch, a été mise hors de doute par les expériences devenues classiques de M. Kuhlmann.

Nous avons mentionné déjà la théorie qui attribue la formation de l'acide nitrique à l'oxydation de l'ammoniaque et des composés gazeux azotés; cette théorie est séduisante, mais elle nous paraît trop exclusive;

on ne peut toutefois s'empêcher de reconnaître qu'elle a singulièrement contribué à éclaircir la question.

L'ammoniaque, qui est le produit constant de la décomposition des matières organiques, dans des circonstances naturelles très-variées, se transforme facilement en acide azotique, sous des influences aussi très-diverses, que nous mettons en action dans les laboratoires, et qui peuvent également se présenter dans la nature.

Les actions de présence encore inexpliquées de certains corps, les phénomènes d'entraînement qui déterminent l'oxydation directe de l'azote, l'action des corps oxydants, sont les causes les plus fréquentes et les mieux connues de l'oxydation de l'ammoniaque.

Ainsi, d'après M. Kuhlmann, en faisant passer un courant de gaz ammoniac mêlé d'air sur de la mousse de platine chauffée à 300 degrés, le métal s'échauffe jusqu'au rouge vif, surtout en présence d'un excès d'air, et il se dégage en abondance de l'acide nitrique mêlé à de l'acide hyponitrique.

Si l'on fait passer le même mélange dans un tube de porcelaine chauffé au rouge, on obtient un peu d'acide hyponitrique et du bioxyde d'azote.

Un courant d'air chargé de carbonate d'ammoniaque, produit également de l'acide nitrique, en passant sur l'éponge de platine chauffée.

La substitution du chlorhydrate d'ammoniaque au carbonate donne lieu à une réaction très-vive ; il se forme un mélange d'acide nitrique et d'acide chlorhydrique, et par suite les produits de la décomposition réciproque de ces corps.

Le cyanogène mêlé d'un excès d'air donne de l'acide carbonique et de l'acide hyponitrique, en présence de la mousse de platine chauffée.

Th. de Saussure a démontré que certaines matières

en décomposition, telles que l'humus, le terreau, le ligneux, la soie, etc., font disparaître un mélange d'oxygène et d'hydrogène dans les proportions qui constituent l'eau ; leur action étant tout à fait comparable à celle de la mousse de platine, on a été conduit à considérer toutes ces matières, ainsi que le fumier, comme pouvant agir aussi par leur présence pour déterminer l'oxydation de l'ammoniaque, pour le transformer en acide nitrique. Le fait est possible, mais il n'a pas été prouvé expérimentalement; les causes d'oxydation dans de telles conditions sont multiples et difficiles à reconnaître.

Quoi qu'il en soit de ce mode d'action invoqué pour expliquer la production naturelle du nitre à la température ordinaire, sous l'influence des corps poreux, on doit regarder le fumier comme l'agent le plus puissant de la nitrification; il se comporte en effet à l'instar des corps oxydables, et il peut alors donner lieu à des phénomènes d'entraînement qui produisent l'oxydation directe de l'azote et bien plus facilement encore celle de l'ammoniaque.

Le fumier donne encore de l'acide nitrique par l'azote qu'il renferme ; il convient donc, sous tous les rapports, à une production abondante de nitre, et c'est avec raison qu'on le préconise et qu'on l'emploie depuis si longtemps pour cet usage.

On doit à M. Collard de Martigny une observation intéressante pour la théorie de la nitrification ; il a constaté que l'ammoniaque, en contact avec l'air et la chaux en bouillie, se convertit directement en acide nitrique ; mais la réaction est lente à la température ordinaire, car il faut cinq à six semaines en été, pour oxyder par ce moyen une petite quantité d'ammoniaque.

La production d'acide nitrique par voie d'entraînement en corrélation avec un phénomène d'oxydation,

a eu pour point de départ les expériences de Lavoisier et de la Place, Cavendish, corroborées depuis par les observations de MM. Chevreul, Boussingault, Schœnbein, etc.; aujourd'hui, on connaît plusieurs faits de même ordre, et il est probable que le nombre en augmentera encore beaucoup par la suite.

M. Peligot le premier a observé la formation du nitrite d'ammoniaque, en quantité assez considérable, en exposant à l'air de la tournure de cuivre arrosée d'ammoniaque.

Depuis, M. Millon a cherché à établir, comme M. Kuhlmann, que l'oxydation de l'ammoniaque est la principale cause de la nitrification, et il a généralisé cette proposition que tous les corps simples ou composés, et toutes les matières organiques qui absorbent de l'oxygène en présence de l'ammoniaque, produisent concurremment une certaine quantité d'acide nitrique. A notre avis, la proposition de M. Millon est à la fois trop étendue et trop restreinte; nous ne croyons pas d'abord qu'il y ait formation d'acide nitrique, dans tous les cas où une matière s'oxyde en présence de l'ammoniaque; et, d'un autre côté, nous pensons avoir démontré, par de nombreux exemples, que l'azote et l'oxygène libres peuvent se combiner par voie d'entraînement, dans certains phénomènes d'oxydation, et que la présence de l'ammoniaque n'est pas du tout indispensable.

L'ammoniaque soumise directement à l'action des corps oxydants, se transforme aisément en acide nitrique; c'est ainsi que le mélange du sulfate d'ammoniaque et d'un composé oxygénant, traité par l'acide sulfurique concentré, et à chaud, produit toujours de l'acide nitrique, et il ne se dégage de l'oxygène qu'autant qu'il n'y a pas assez de sulfate d'ammoniaque en présence.

Le bichromate de potasse, le bioxyde de manganèse, l'oxyde puce de plomb, le minium, le bioxyde de baryum, sont les corps oxydants employés avec succès par M. Kuhlmann, pour produire cette réaction.

D'après le même chimiste, si l'on soumet à l'action de la chaleur un mélange de sulfate d'ammoniaque et de nitrate ou de chlorate de potasse, la base volatile se transforme complétement en gaz nitreux.

Dans une note relative à l'action du permanganate de potasse sur les matières azotées, M. Guignet et moi, nous sommes parvenus à acidifier l'ammoniaque, par l'action seule du sel en dissolution, sans addition d'acide sulfurique.

Le permanganate de potasse n'existant pas dans le sol, M. Paul Thénard a pensé que le peroxyde de fer contenu dans la terre arable, doit se comporter de la même manière que ce sel, et déterminer directement l'oxydation de l'ammoniaque. Cette vue ingénieuse a été, depuis, développée par M. Kuhlmann, qui a considéré l'oxyde de fer du sol comme le principal agent comburant des matières organiques et de l'ammoniaque, avec cette circonstance particulière, qu'une quantité minime d'oxyde peut agir indéfiniment et transformer en acide nitrique une quantité illimitée d'ammoniaque. Ce corps joue, dans la nitrification, le même rôle que le bioxyde d'azote dans la fabrication de l'acide sulfurique; en cédant d'abord une partie de son oxygène aux corps oxydables avec lesquels il est en contact, il se trouve ramené au minimum d'oxydation, et, dans cet état, il prend à l'air de nouvel oxygène pour se suroxyder, et devenir apte à nitrifier de nouveau l'ammoniaque. On conçoit que le même effet peut se produire d'une manière continue, et, pour ainsi dire, indéfiniment.

L'ammoniaque et les sels ammoniacaux se nitrifient

dans une foule de circonstances, avec la plus grande facilité ; il faut reconnaître qu'ils contribuent, pour une large part, à la formation de l'acide nitrique ou des nitrates existant dans le sol, dans les eaux et même dans l'air.

## XVI

### Nitrification des matières organiques azotées.

On admet généralement, et avec raison, que les matières organiques azotées accélèrent la production du nitre dans les nitrières et augmentent considérablement la quantité de sel formé. C'est là le fait brut de l'observation, dont nous pouvons parfaitement nous rendre compte, d'après ce que nous savons.

La décomposition des matières organiques azotées, dans un milieu humide et à une température convenable, donne lieu à la formation d'une certaine quantité de carbonate d'ammoniaque : or, nous venons de voir que ce sel se change facilement en acide nitrique; en second lieu, le carbone et l'hydrogène de la matière en décomposition s'oxydant au contact de l'air, produisent, par voie d'entraînement, la nitrification de l'ammoniaque, et, de plus, celle de l'azote de l'air; c'est une seconde cause d'augmentation de la quantité d'acide formée, mais nous n'avons pas à revenir sur ce point; ce que nous voulons établir, c'est la possibilité de l'oxydation directe et rapide de l'azote de la matière organique, sans faire passer préalablement ce corps à l'état de carbonate d'ammoniaque.

Dans un travail récent que j'ai déjà eu l'occasion

de citer, M. Guignet et moi nous avons indiqué un procédé général pour opérer cette transformation; nous avons montré que toutes les matières organiques azotées, soumises à l'action d'une dissolution bouillante de permanganate alcalin, donnent du nitrate que l'on peut facilement extraire et faire cristalliser.

Tous les composés azotés solubles s'oxydent par ce moyen en très-peu de temps; ceux qui sont insolubles sont plus difficiles à attaquer; mais en ajoutant au réactif oxydant un peu de potasse, la dissolution s'opère aisément, et la transformation a lieu alors de la même façon qu'avec les matières solubles.

En opérant dans des conditions convenables, avec un excès de permanganate, l'azote de la matière traitée passe entièrement à l'état d'acide nitrique, de sorte que la quantité de nitrate obtenue correspond, à peu de chose près, à la quantité d'azote contenue dans la substance traitée. Les principales matières essayées et qui ont donné des résultats satisfaisants sont: l'urée, l'aniline, la quinine, la cinchonine, la strychnine, la morphine, l'acide cyanurique, l'acide urique, l'albumine, la caséine, la fibrine, la gélatine, la soie, la laine, le crin, la peau, la corne, le fumier, etc.

On sait depuis longtemps que les matières azotées, chauffées avec de l'oxyde de cuivre, fournissent souvent des traces de composés nitreux; c'est un fait malheureusement trop fréquent, que l'on a beaucoup de peine à empêcher dans les analyses élémentaires organiques.

On a constaté aussi que la solution de gélatine, chauffée avec du peroxyde de manganèse ou de l'acide chromique, produit un peu d'acide nitrique; c'était là un fait exceptionnel qui ne se trouve plus maintenant isolé.

Enfin, M. Paul Thénard a obtenu de l'acide nitrique

par l'action de l'oxygène naissant ou allotropique, sur diverses matières azotées retirées du fumier, notamment sur l'acide fumique.

Tous ces faits prouvent que les matières organiques azotées, soumises à des agents convenables d'oxydation, fournissent par leur azote, de l'acide nitrique, de la même manière que par leur hydrogène et leur carbone, elles donnent de l'eau et de l'acide carbonique.

Nous avons terminé ce que nous voulions vous dire sur la nitrification. Nous nous sommes peut-être trop étendu sur certains points, mais nous avons dû, à notre grand regret, nous restreindre sur d'autres. En somme, nous avons exposé les principales circonstances dans lesquelles l'azote libre, les composés nitreux, l'ammoniaque ou les sels ammoniacaux, les matières organiques azotées, peuvent s'oxyder en se transformant en acide nitrique. La question de la nitrification présente encore quelques points douteux; elle occupera sans doute, à l'avenir, beaucoup de chimistes, mais elle ne nous paraît pas de nature à être le sujet de grandes découvertes. Nous la considérons, avec notre premier et savant maître M. Frémy, comme un des points les mieux étudiés de la chimie générale.

---

# ASSIMILATION

# DE L'AZOTE DES PLANTES

ET

## CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

## SUR LE ROLE DES NITRATES DANS LA VÉGÉTATION.

1. La question de l'assimilation de l'azote des plantes préoccupe vivement, depuis longtemps déjà, les physiologistes, les agronomes et les chimistes. On a fait beaucoup d'expériences pour arriver à une solution; mais jusqu'à présent le but n'a pas été complétement atteint, et il s'écoulera peut-être bien du temps avant que l'on ait des résultats précis et certains.

Quelques chimistes font jouer à l'azote de l'air un grand rôle dans la végétation, en admettant que cet élément peut être absorbé par les plantes à l'état de gaz, et servir directement à leur nutrition. D'autres prétendent que l'azote assimilé par les végétaux, a pour origine l'ammoniaque et les combinaisons ammoniacales, existant dans le sol où ils croissent. Il y en a qui pensent que les plantes peuvent emprunter leur azote à la fois à l'air, et aux combinaisons salines azo-

tées, comprenant les sels ammoniacaux et les nitrates; enfin, on peut encore admettre que certaines matières organiques azotées sont assimilées, par les plantes, sans décomposition préalable, et contribuent pour une certaine part à leur accroissement.

Théoriquement, l'azote peut donc arriver dans les plantes sous quatre formes différentes, savoir :

1° Sous la forme d'azote libre emprunté à l'air;
2° — d'ammoniaque dans les sels ammoniacaux;
3° — d'acide nitrique dans les nitrates;
4° — de matière organique azotée fournie par les engrais.

2. *Assimilation de l'azote libre.* Priestley le premier, et, après lui, Ingenhousz, admirent que l'azote libre de l'air peut être absorbé par les plantes et servir à leur nutrition. Cette opinion a été réfutée plus tard par Th. de Saussure, qui, après s'être assuré que les plantes ne condensent pas le gaz azote, et après avoir constaté la présence de l'ammoniaque dans l'air, a été conduit à reconnaître « que les plantes ne s'assimilent leur azote que dans les extraits végétaux et animaux, et dans les vapeurs ammoniacales ou d'autres composés solubles dans l'eau qu'elles peuvent absorber dans le sol et dans l'atmosphère. »

La question tranchée par de Saussure a été, depuis, traitée bien souvent, et elle a occasionné de vives controverses; l'assimilation directe de l'azote compte encore quelques partisans; mais, à notre avis, d'après tout ce que nous savons sur la facilité avec laquelle l'ammoniaque et l'acide nitrique se forment, cette théorie doit être rejetée. Les expériences authentiques faites en 1854, au Muséum, lui ont été, il est vrai, favorables; mais, à cette époque, il est bon de le rappeler, il n'était pas question des nitrates comme

source directe de l'azote des plantes, et comme nous avons la conviction qu'il a dû se former une petite quantité de nitrates, dans les expériences auxquelles nous avons assisté, nous attribuons à ces sels l'excès d'azote trouvé dans la récolte. Notre opinion sur ce point n'a jamais varié; elle a été émise en 1854, pendant le cours des expériences, et elle a été le point de départ de nos recherches sur la nitrification dont vous connaissez les conclusions. Notre manière de voir ne reposait d'abord que sur une hypothèse; elle s'appuie maintenant sur des faits nombreux qui nous permettent de la considérer comme suffisamment prouvée et parfaitement bien fondée

Nous ne croyons pas, en définitive, à l'assimilation directe de l'azote de l'air par les plantes, et nous attribuons aux nitrates l'origine de l'azote, que certains chimistes rapportent à l'air.

3. *Modes d'action de l'ammoniaque et des sels ammoniacaux dans la végétation.* L'ammoniaque et les sels ammoniacaux favorisent la végétation, c'est un fait incontestable; mais quel est le mode d'action de ces composés, les plantes les absorbent-elles dans l'état où nous les répandons sur le sol, et peuvent-ils alors être assimilés directement, et servir avantageusement à leur accroissement? Il y a une quinzaine d'années, tous les agronomes admettaient l'assimilation directe, la plupart même étaient disposés à considérer l'ammoniaque comme l'unique forme sous laquelle l'azote pénètre dans les plantes; aujourd'hui les avis sont partagés, la grande majorité des chimistes penche encore pour l'ancienne opinion; mais il y en a quelques-uns qui la rejettent complétement.

L'action favorable de l'ammoniaque et des sels ammoniacaux a été constatée pratiquement dans presque tous les pays civilisés, et par les agronomes les plus

éminents. Nous admettons le fait comme exact, mais nous pensons qu'il a été mal interprété, et nous vous demandons la permission de développer sur ce point notre opinion.

L'ammoniaque est utile aux plantes dans le cas où elle trouve dans le sol les conditions favorables à son oxydation, à sa transformation en acide nitrique; dans le cas contraire, elle agit comme un véritable poison.

En 1843, M. Bouchardat a communiqué à l'Académie des sciences un *Mémoire sur l'influence des composés ammoniacaux sur la végétation*, et il a été conduit aux conclusions suivantes :

1° Les dissolutions des sels ammoniacaux communément employés ne fournissent pas aux végétaux l'azote qu'ils s'assimilent;

2° Lorsque ces dissolutions à un millième sont absorbées par les racines des plantes, elles agissent toutes comme des poisons énergiques.

Ces conclusions, à l'époque où elles ont été présentées, paraissaient en désaccord avec les faits généralement connus; elles n'ont pas été admises par les chimistes, elles ont de plus été réfutées par M. Kuhlmann, dans une série de mémoires comprenant ses expériences sur la théorie des engrais.

Les conclusions du mémoire de M. Bourchardat étaient cependant parfaitement justes, nous avons répété plusieurs fois les expériences, et nous avons obtenu constamment les résultats annoncés.

Il est bon de remarquer que dans les conditions ordinaires de l'emploi des sels ammoniacaux, conditions où s'est placé M. Kuhlmann, ces composés trouvent dans le sol les circonstances favorables à la nitrification; dans les essais de M. Bouchardat, au contraire, on fait tremper la plante dans une dissolution saline,

où l'oxydation de l'ammoniaque ne peut pas avoir lieu; cette distinction explique la contradiction existant entre les conclusions de M. Bouchardat et l'opinion de MM. Liebig, Dumas, Boussingault, Kuhlmann, Schattenmann, etc.

Dans un travail fait avec M. Gratiolet, sur la végétation des plantes submergées, nous avons consigné une observation, qui rend sensibles à la vue les effets nuisibles des sels ammoniacaux, toutes les fois qu'on les présente aux plantes, dans un milieu où ils ne trouvent pas les conditions convenables à la nitrification.

On sait que les plantes aquatiques exposées à la lumière, dans de l'eau distillée tenant en dissolution de l'acide carbonique, donnent lieu à un dégagement très-abondant de gaz oxygène; si l'on ajoute une quantité, même très-minime, d'un sel ammoniacal à la dissolution aqueuse d'acide carbonique, au moment où le phénomène de décomposition de cet acide se produit avec le plus d'activité, le dégagement d'oxygène diminue rapidement, pour cesser bientôt avec la mort de la plante.

Cette observation nous a porté à conclure que les sels ammoniacaux en dissolution dans l'eau à la dose de 0,0001, sont nuisibles à la végétation des plantes aquatiques; j'ajoute aujourd'hui que cet effet a lieu par la raison déjà énoncée, c'est que ces sels ne sont pas dans des conditions convenables pour être oxydés et transformés en nitrates.

Je dois à l'obligeance de M. le professeur Decaisne une observation semblable à la précédente; elle est même beaucoup plus instructive, car elle montre la confiance que les agriculteurs et les horticulteurs prudents doivent ajouter aux panacées prônées par certains chimistes.

Un horticulteur habile et distingué, M. Van Houtte, voulait présenter à la grande Exposition d'horticulture une espèce de nymphéacée très-curieuse et assez rare. Dans le but d'activer la végétation de la plante, M. Van Houtte ajouta à l'eau du bassin où elle se trouvait, une petite quantité de carbonate d'ammoniaque; au lieu de prospérer, la plante mourut au bout de quelques jours; le résultat parut bien étonnant; pour nous, il est tout naturel, et nous l'expliquons de la même manière que les précédents.

Nous ne proscrivons nullement l'emploi des sels ammoniacaux en agriculture; ce sont, à nos yeux, des agents puissants de fertilisation, pourvu toutefois qu'ils trouvent dans le sol les conditions nécessaires à leur transformation en acide nitrique et en nitrates. Notre manière de voir, à cet égard, est le contre-pied de celle de M. Kuhlmann; au lieu d'admettre, avec le célèbre chimiste Lillois, que les nitrates employés pour la fertilisation des terres n'agissent efficacement que lorsque l'acide nitrique a été ramené dans la profondeur du sol à l'état d'ammoniaque par l'action désoxygénante de la fermentation putride, j'essaye de prouver, en me fondant sur les observations précédentes, que, lorsque les sels ammoniacaux interviennent comme engrais, l'ammoniaque doit se nitrifier dans le sol avant d'être absorbée par la plante pour contribuer à son accroissement.

4. *Du rôle des matières organiques azotées.* — Les substances organiques azotées solubles peuvent-elles s'assimiler aux plantes? De Saussure l'admettait, quelques chimistes encore le pensent; mais rien n'est moins prouvé. Dans le doute, il est sage de s'abstenir; aussi nous ne tranchons pas la question, et nous pensons qu'elle doit être soumise à de nouvelles investigations. Dans le cas où les matières organiques se

décomposent, elles produisent de l'ammoniaque, de l'acide nitrique, de l'acide carbonique, etc.; leur action fertilisante est alors très-puissante, mais il est clair que les effets produits ne sont pas dus à la matière organique elle-même; ils doivent être attribués aux produits de sa décomposition.

5. *Influence des nitrates sur la végétation.* — De tout temps le nitre a joué un grand rôle dans la végétation. Glauber célèbre à tout moment ses vertus; il le présente comme le seul principe de la végétation. Le nitre cru, d'après Bacon, est la vie des plantes; c'est le sel de fécondité; si la superficie de la terre n'en était imprégnée, elle ne pourrait produire aucune plante. Toutes celles qui naissent dans des endroits où le nitre s'est attaché sont toujours extraordinairement grandes et bien nourries. L'abbé de Vallemont, dans ses *Curiosités de la nature et de l'art*, ne tarit pas quand il s'agit du nitre et de son action sur les plantes. Home également, dans ses *Principes de l'agriculture et de la végétation*, en fait le plus grand éloge, et l'acide nitreux lui paraît être le principe fertilisant qu'il avait d'abord découvert dans l'air. A une époque plus rapprochée de nous, Pietsch prouve expérimentalement l'absorption du nitre par les plantes : « Si l'on prend, dit ce chimiste, un vase d'une matière aussi peu poreuse qu'il est possible et fermé par en bas, et que l'on y mette de la terre mêlée avec une certaine quantité de nitre cru, dont on connaît exactement le poids, qu'on y sème de la graine de jusquiame, d'atriplex ou de quelque autre plante de pareille grosseur, et qu'on l'arrose souvent avec de l'eau lorsque l'herbe sera devenue grande, qu'on examine combien de nitre y sera resté, et l'on verra qu'il n'y en a plus guère, ou peut-être point du tout. »

On n'en finirait pas si on voulait rapporter ce que les

anciens ont écrit relativement à l'action du nitre sur les plantes ; nous n'avons pas le loisir de nous livrer à cette digression, et nous allons vous exposer immédiatement comment nous considérons le mode d'action de l'acide nitrique, qui est, suivant nous, l'unique source de l'azote des plantes.

Les parties vertes des végétaux, exposées à la lumière, décomposent l'acide carbonique en retenant du carbone et en laissant échapper de l'oxygène ; elles décomposent de même l'eau, dont elles s'assimilent l'hydrogène. Dans ces conditions, les plantes fonctionnent comme de véritables corps réducteurs.

Par analogie, il me semble qu'elles doivent se comporter à l'égard de l'acide nitrique comme à l'égard de l'eau et de l'acide carbonique : l'azote se trouverait retenu et assimilé comme le carbone et l'hydrogène, tandis que l'oxygène serait éliminé.

J'attache une grande importance à cette manière de voir exprimée en 1854 et publiée l'année suivante ; elle est conforme à tous les faits connus. Ainsi, loin d'admettre que l'acide nitrique est réduit dans le sol par la fermentation putride et ramené à l'état d'ammoniaque, je pense, au contraire, que l'ammoniaque doit toujours se nitrifier ; et, en effet, ne sait-on pas, depuis le célèbre Marggraff, qu'il existe des nitrates, quelquefois en quantité considérable, dans toutes les eaux souterraines ; le même fait n'a-t-il pas été observé récemment par M. Barral dans les eaux de drainage ?

La nécessité de la nitrification de l'ammoniaque et de l'azote des matières organiques employées comme engrais explique les bons effets de l'aération du sol ; elle indique l'utilité des labours multipliés et profonds ; elle justifie même, jusqu'à un certain point, la pratique de la jachère ; elle est cause que toute végétation est

languissante par la sécheresse, et que tous les terrains acides, fussent-ils même chargés d'engrais azotés, sont généralement stériles.

Nos ancêtres connaissaient parfaitement la relation intime existant entre les moyens employés pour activer la nitrification et ceux dont on se sert ordinairement pour fertiliser les terres.

Je ne puis mieux faire, pour vous en convaincre, que de vous citer, en terminant, le passage d'une lettre adressée par le chevalier de Dolomieu au duc de Larochefoucauld, et insérée dans les *Mémoires sur la formation du salpêtre*, p. 619.

« .... Je crois, dit le chevalier de Dolomieu, que les découvertes sur la génération du salpêtre, que doit nous donner le concours au prix de l'Académie, pourront bien aussi nous instruire sur les principes de la végétation. Pour mettre un terrain dans son plus grand rapport, dans sa plus grande valeur, fait-on autre chose, par les labours multipliés, que présenter successivement au contact de l'air les différentes parties de la surface du terrain ? On introduit des substances animales ou végétales en putréfaction, on mêle à une terre trop argileuse et trop tenace de la marne calcaire, et différentes espèces de sels ; à une terre maigre et crétacée, de l'argile, etc., tous moyens employés avec succès pour avoir du nitre. Aussi n'est-il point de terres en plein rapport, en France et ailleurs, qui ne donnent du nitre par la lixiviation ; j'en ai fait l'expérience dans plusieurs provinces de France et à Malte ; M. Bowles l'a faite en Espagne. D'après cela, ne pourrait-on pas soupçonner qu'un des principes de la végétation, une de ses principales causes et qui la met en action, est ce même sel nitreux dont on cherche maintenant à deviner la génération ? On pourrait suivre plus loin cette analogie entre les moyens de produire du

salpêtre et ceux dont on se sert pour mettre une terre dans sa plus grande valeur ; mais ce simple aperçu doit suffire pour faire faire des observations relatives à ce double objet. »

---

# EFFETS LUMINEUX

QUI RÉSULTENT

# DE L'ACTION DE LA LUMIÈRE

# SUR LES CORPS

LEÇON FAITE LE 19 AVRIL 1861

A LA SOCIÉTÉ CHIMIQUE DE PARIS

PAR M. EDMOND BECQUEREL

PROFESSEUR DE PHYSIQUE AU CONSERVATOIRE IMPÉRIAL DES ARTS ET MÉTIERS.

MESSIEURS,

On comprend sous le nom de phénomènes de phosphorescence (1), des phénomènes différents, quant à l'origine, mais en vertu desquels un grand nombre de corps ont la faculté d'émettre de la lumière quand on les place dans des conditions très-diverses. Les uns sont produits par élévation de température, et cela à une limite inférieure à la température rouge où tous les corps deviennent lumineux; tels sont les phénomènes que présentent le spath-fluor, la craie, etc., quand on les chauffe; d'autres, se manifestent dans le frottement et pendant le clivage ou la cristallisation de certaines substances; d'autres, se présentent spontanément dans des corps organisés et même dans des animaux comme les lampyres et les fulgores; d'autres, enfin, sont produits spécialement sous l'influence de la lumière. Ces divers effets proviennent d'une même cause et dépendent d'un mouvement vibratoire imprimé par des actions différentes aux molécules des corps. Aujourd'hui, je ne parlerai que de ces derniers, c'est-à-dire des phénomènes lumineux qui suivent l'impression de la lumière; ce sont ceux qui ont le plus attiré l'attention, car ils sont liés à la constitution

(1) Voy. *Annales de chimie et de physique*, 3e série, tome LV, page 5; tome LVII, page 40; et tome LXII, page 5.

moléculaire des corps qui subissent l'influence du rayonnement et servent à montrer de quelle manière l'action de la lumière se communique aux particules de la matière.

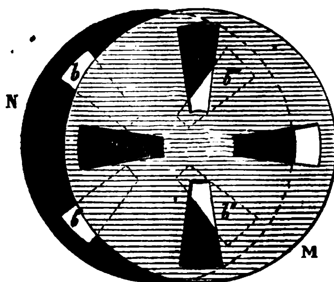
Les effets qui se rapportent à ce sujet paraissent avoir été observés, d'abord avec des pierres précieuses (1); puis en 1604 avec la pierre de Bologne calcinée, ou phosphore de Bologne (sulfure de barium), qui a eu une certaine célébrité dans les deux derniers siècles; ensuite à l'aide d'autres substances, et principalement des mélanges de sulfures alcalino-terreux. Pour observer ces effets, on se plaçait dans une chambre noire et, au moyen d'une ouverture pratiquée dans le volet, on exposait les corps à l'action de la lumière diffuse ou solaire; en rentrant ceux-ci dans l'obscurité, ils émettaient alors une lueur en général assez faible, allant en décroissant rapidement, pour cesser après un temps plus ou moins long (quelquefois après plusieurs heures). Parmi les physiciens qui se sont occupés de ces effets (2), on peut citer comme s'étant plus spécialement livrés à leur étude, Boyle, Dufay, Canton, Beccaria, Wilson et Dessaigne.

Ce n'était, comme on le voit, que dans des cas très-restreints que les observations pouvaient être faites, et alors que certains corps présentaient une persistance assez grande dans l'impression exercée de la part de la lumière; en outre, l'on n'était pas fixé sur la cause en vertu de laquelle ces corps étaient rendus lumineux. Ce n'est qu'après être arrivé à la construction d'un appareil que j'ai nommé *phosphoroscope*, lequel permet de rendre continue l'observation des corps soumis à l'influence de la lumière, que j'ai pu

(1) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, tome LV, page 9.
(2) Id. tome LV, page 12.

reconnaître non-seulement que le phénomène de phosphorescence par insolation était beaucoup plus général qu'on ne le pensait, mais encore préciser les conditions dans lesquelles il se produit.

Cet appareil est fondé sur le principe suivant : Qu'on imagine au milieu d'une chambre noire deux disques verticaux M et N, fixés d'une manière permanente à un



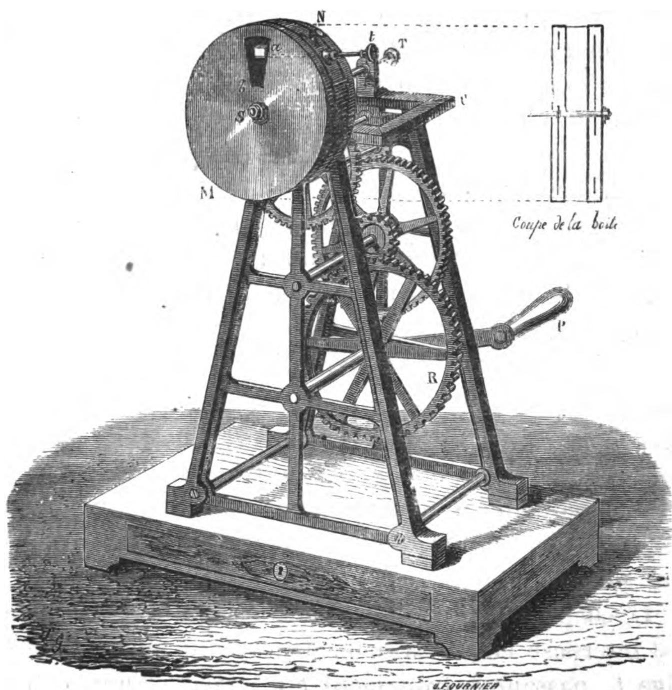

axe horizontal, à peu de distance l'un de l'autre (1 centimètre environ), et pouvant recevoir un mouvement de rotation autour de cet axe. Supposons que le premier disque M porte quatre ouvertures $a$, $a'$ $a''$, $a'''$ de 22° 30' de grandeur angulaire et placées symétriquement autour du centre, et que le second disque N porte également quatre ouvertures semblables $b$, $b'$ $b''$, $b'''$, mais ne correspondant pas aux quatre précédentes, de sorte que chaque espace vide $a$, $a'$ $a''$, $a'''$, soit en regard d'un espace plein du second disque, et *vice versa*. Si l'on dirige d'une manière fixe un faisceau de rayons solaires sur le disque antérieur M, perpendiculairement à ce disque et près de la circonférence, ce faisceau ne pénétrera de l'autre côté que si l'une des ouvertures $a$, $a'$, $a''$, $a'''$, se trouve dans la direction de ce faisceau ; mais dans ce cas, il sera arrêté par l'autre disque. En donnant donc un mouvement de rotation au système des deux disques autour de leur axe commun, jamais le fais-

ceau lumineux ne pourra le traverser, car il faudrait arriver à une vitesse telle, que la lumière pût passer d'un disque à un autre pendant la durée de la rotation de la moitié d'un intervalle plein, ce qui, avec la vitesse connue de la lumière, ne serait atteint que par un mouvement de rotation de plus de 2 milliards de tours par seconde; or, on ne peut guère dans ces appareils aller au delà d'une vitesse de quatre à cinq cents tours par seconde. Ainsi ce système des deux disques M et N, interposé entre un observateur et le volet d'une chambre noire par où arrive le faisceau lumineux sur le disque antérieur, fera l'effet d'un écran opaque dans toute son étendue.

Mais si, entre les deux disques, on place un corps dans une position fixe et dans la direction du faisceau lumineux, ce corps pourra recevoir de la lumière chaque fois que, par le mouvement de rotation, une ouverture du premier disque M passera entre lui et la source lumineuse. Si alors ce corps devient actif et émet, après l'insolation, des rayons en vertu de son action propre; si en outre cette émission présente une certaine durée, l'observateur placé de l'autre côté au delà de N, verra le corps chaque fois qu'une ouverture de ce second disque N passera entre lui et le corps. Il faut, bien entendu, que le mouvement de rotation soit tel que la durée de l'émission lumineuse du corps en vertu de son action propre soit plus grande que celle du passage de la moitié d'un espace plein des disques devant l'observateur.

L'appareil suivant réalise cette disposition et permet de voir les corps d'une manière continue après l'impression de la lumière et en vertu de leur action propre, en éliminant toute trace de lumière incidente, même quand la durée de l'impression de la lumière n'est que de $\frac{1}{5000}$ de seconde.

MN est une boîte cylindrique de 10 centimètres de diamètre environ, fixée sur un montant en fonte et pouvant se placer dans une position quelconque. Cette




boîte renferme un système de deux disques mobiles percés d'ouvertures, et analogue à celui qui vient d'être décrit plus haut. Cette boîte a ses faces à double fond, comme l'indique la coupe de la boîte figurée à côté de l'appareil, de sorte que chacun des disques peut se mouvoir entre deux plaques métalliques en passant très-près de leur surface. Les faces de cette boîte, à l'intérieur comme à l'extérieur, sont percées d'ouvertures telles que *b*, qui se correspondent exactement et qui ont même grandeur angulaire que les

ouvertures des disques mobiles intérieurs. Si donc ces disques mobiles n'existaient pas, la lumière venant à tomber sur la partie antérieure de MN traverserait la boîte de part en part ; mais du moment que les disques mobiles se trouvent dans l'intérieur, la lumière incidente ne peut plus passer et l'appareil fonctionne pour permettre l'observation des effets de phosphorescence comme cela a été dit plus haut, page 6.

Les deux disques mobiles reçoivent leur mouvement dans la boîte fixe MN, à l'aide d'un axe ST. Cet axe, au moyen d'engrenages est mis en rotation à l'aide d'une manivelle P, ou bien d'un ressort, ou encore d'un tambour monté sur l'axe de la grande roue R, et autour duquel s'enroule une corde tirée par un poids. Dans l'appareil dont j'ai fait le plus souvent usage, quand le grand axe fait un tour, l'axe du dernier mobile fait 143 révolutions. On ne peut, du reste, avec la manivelle P faire au delà de 3 à 4 tours par seconde ; par conséquent les disques mobiles ne peuvent guère exécuter au delà de quatre à cinq cents révolutions par seconde.

Le corps *a* qui doit recevoir l'action de la lumière est interposé entre les deux disques au moyen d'une tige *t*, passant à frottement au travers d'une petite plaque qui se place sur le côté de la boîte à l'aide d'un bouton. On peut le placer également dans un étrier qui s'adapte à la partie supérieure de la boîte MN, comme on l'a fait dans plusieurs appareils qui sont également ici sous vos yeux.

Afin que lors du mouvement des disques mobiles il n'y ait aucune trace de lumière diffuse qui vienne entraver la marche des observations, il est nécessaire que la dimension angulaire des parties pleines de ces disques soit égale à trois fois celle des parties vides ; d'après cela, les ouvertures doivent être en nombre pair.

Les appareils dont les disques mobiles ont 4 ouvertures de 22° 30′ sont ceux qui m'ont donné les meilleurs résultats, surtout pour les expériences dont il sera question plus loin. On a construit des appareils du même genre avec des ouvertures différentes de grandeur, soit pour les expériences de démonstration qui vont être faites dans cette séance, soit en vue d'effets spéciaux produits sur différentes classes de substances (1).

Une étude attentive de l'emploi du phosphoroscope m'a montré que, lorsque l'axe de cet appareil est en mouvement, le corps impressionnable placé au milieu n'est éclairé par la lumière incidente que pendant une série d'intervalles de temps très-courts dont la mesure est la durée du passage d'une ouverture des disques mobiles : d'après la largeur angulaire des ouvertures de l'appareil décrit plus haut (22° 30′, les intervalles pleins ayant 67° 30′), quand le grand axe fait un tour en une seconde, la roue des disques en faisant 143, le temps du passage d'une ouverture est de $\frac{1}{143 \cdot 16} = \frac{1}{2288}$ ou de 0″,00044.

Ainsi, suivant la vitesse du phosphoroscope, le corps reçoit une série d'éclairements successifs pendant des temps très-courts et bien déterminés. Le temps qui sépare le moment où l'insolation cesse, de l'instant où l'observateur voit le corps au milieu de l'ouverture et que je nommerai *temps moyen*, est représenté par la vitesse d'un point parcourant un arc égal à la moitié d'un espace obscur ou de 33° 43′, il est donc les $\frac{3}{2}$ de la fraction indiquée plus haut, c'est-à-dire que pour une seconde du temps de la rotation du grand axe, ce temps moyen est de 0″,00066.

Quand un corps devient visible dans le phosphoro-

(1) Voy. *Annales de chimie et de physique*, 3e série, tome LXII, page 8 et suivantes.

scope, l'observateur reçoit donc l'impression lumineuse qui s'est conservée après ce dernier temps, et cela en totalité pendant les passages de chaque ouverture; ces passages étant successifs, l'effet lumineux est rendu continu. Mais si avec une vitesse déterminée V, du grand axe de l'appareil on voit le corps lumineux et que l'on mesure l'intensité de la lumière donnée par ce corps, cette intensité peut être considérée comme représentant celle de la lumière émise après une insolation qui a duré $\frac{v''}{2288}$ et alors que le corps est vu, en moyenne, $\frac{v''}{1530}$ après cette insolation.

On suppose, bien entendu, que la durée du passage d'une ouverture suffit pour insoler le corps : cela est vrai pour un certain nombre de substances, quand l'intensité de la lumière excitatrice est suffisante; pour d'autres, comme on le verra plus loin, et notamment pour les corps qui conservent pendant assez longtemps l'impression de la lumière et que l'on a nommés phosphores artificiels, une seule insolation ne donne pas le maximum d'effet, surtout avec une faible intensité lumineuse excitatrice, mais le passage successif des ouvertures conduit au même résultat et donne au corps le maximum d'effet qu'il peut recevoir, et qui est atteint au bout d'un temps assez court. C'est pour ce motif qu'avec ces derniers corps, sauf des exceptions dont il sera question plus loin, les intensités lumineuses sont indépendantes de la vitesse de rotation du phosphoroscope entre les limites où j'ai opéré. Afin de diminuer le temps nécessaire pour que le corps ait le maximum d'effet et soit inférieur à la durée de passage d'une ouverture du disque mobile de l'appareil devant l'observateur, il faut donc augmenter le plus possible l'intensité de la lumière incidente, c'est-à-dire concentrer cette lumière avec une lentille.

On voit en résumé, d'après ce qui précède, que si

un très-grand nombre de corps deviennent lumineux dans l'appareil, l'effet produit sur un observateur est continu, car l'impression que ces corps reçoivent de la part du rayonnement se reproduit périodiquement chaque fois qu'une ouverture du disque antérieur mobile passe devant eux. Il résulte également de là que, pour une vitesse de rotation uniforme, l'intensité de la lumière émise reste la même si celle de la lumière incidente ne change pas, et que cette intensité dépend de la vitesse de rotation elle-même. Il faut encore remarquer, et j'insiste sur ce point, que l'intensité de la lumière émise augmente avec la vitesse de rotation jusqu'à une certaine limite, différente pour chaque corps, et atteint un maximum que l'on ne peut dépasser, quelle que soit ultérieurement la vitesse de l'appareil; ce dernier effet provient de ce que si le temps qui sépare le moment de l'insolation de l'instant de la vision devient de plus en plus court, le temps pendant lequel le corps est éclairé diminue dans le même rapport, et lorsque le corps reçoit de la part de a lumière incidente autant qu'il perd pendant qu'il n'est plus soumis à son action, le maximum est atteint.

On peut aisément, à l'aide de différents corps, donner des exemples des effets précédents, c'est-à-dire de l'intensité lumineuse constante avec une vitesse de rotation constante du phosphoroscope, de l'augmentation de cette intensité quand on fait tourner l'appareil plus rapidement, et de l'établissement du maximum d'action.

Le spath d'Islande excité par la lumière solaire blanche ou par la lumière électrique, devient lumineux orangé avec une vitesse très-petite de l'appareil; puis, le maximum de lumière est atteint très-vite. En effet, le corps une fois insolé n'émet plus de lumière

d'une manière appréciable $\frac{1}{3}$ de seconde après avoir été soumis à l'action de la lumière. Parmi les variétés de spath d'Islande les plus lumineuses, on peut citer les spath équiaxes et surtout les variétés prismatiques.

Le verre ordinaire crown ou flint, placé dans les mêmes conditions, donne une lumière verdâtre plus ou moins vive: le maximum est atteint avec une vitesse un peu plus grande qu'en employant le spath d'Islande, car ce n'est qu'après $\frac{1}{20}$ de seconde environ que les rayons émis ne sont plus appréciables.

L'alumine (coryndon ou alumine calcinée) présente une lumière d'un beau rouge; après $\frac{1}{20}$ de seconde les rayons émis ne sont plus perceptibles. Les rubis sont les variétés de coryndons qui présentent les effets les plus énergiques.

L'azotate d'urane donne une lumière verte qui devient très-vive quand on tourne très-rapidement l'appareil, car ce n'est que lorsqu'il se passe plus de $\frac{1}{100}$ de seconde entre le moment où l'insolation cesse et l'instant de la vision, que les rayons émis par le corps ne peuvent plus être aperçus par l'observateur.

Du reste, plusieurs platino-cyanures ne donnent plus d'effets appréciables après $\frac{1}{3000}$ ou $\frac{1}{4000}$ de seconde, et le bisulfate de quinine présente une limite encore plus reculée.

Ainsi le phosphoroscope résoud le problème de faire voir un corps au moyen de la lumière émise en vertu de son action propre et après l'influence du rayonnement, et non pas en vertu des rayons diffusés de la lumière incidente; il tamise pour ainsi dire la lumière qu'un corps peut émettre, quand ce corps reçoit un faisceau lumineux sur sa surface. Cet effet est produit en raison de ce que l'émission lumineuse par action propre des corps offre une certaine durée.

Dans l'appareil qui a été décrit plus haut, le corps

est vu par transparence du côté opposé à celui par lequel la lumière incidente vient le frapper; quand le corps a une petite épaisseur cela est indifférent, même quand il est presque opaque. Il est facile de comprendre qu'à l'aide du même principe on a pu construire des appareils de divers modèles, dans lesquels le corps est vu du côté même par lequel la lumière extérieure vient l'influencer.

Les effets généraux que l'on peut observer étant indiqués, il faut examiner :

1° Comment varient ces effets suivant la nature, l'état physique et la température des corps;

2° Quelle est la composition de la lumière émise;

3° Quelle est l'intensité de la lumière émise après des temps différents depuis l'origine de l'extinction lumineuse, c'est-à-dire quelles sont les lois de l'extinction et de l'illumination des corps;

4° Comment les actions varient suivant la composition de la lumière incidente, c'est-à-dire suivant le mode d'excitation communiqué aux corps.

### 1° Nature et état physique du corps.

Si l'on s'en tient à une très-faible émission de lumière, un très-grand nombre de corps solides, et l'on peut même dire le plus grand nombre, deviennent lumineux dans le phosphoroscope quand ils sont éclairés par la lumière solaire ou par la lumière électrique fortement concentrée avec une lentille. Il n'y a pas besoin qu'ils soient transparents pour être observés dans l'appareil; il suffit qu'ils soient faiblement translucides et qu'ils aient une épaisseur très-petite. Mais il y a un certain nombre de corps solides dont l'action présente quelque intensité et dont nous allons indiquer la nature.

Parmi les corps simples, indépendamment du carbone à l'état de diamant, on peut citer le soufre comme présentant une faible action. Les métaux n'ont donné jusqu'ici aucune action appréciable.

Les bases alcalines, alcalino-terreuses, les terres et la plupart de leurs combinaisons, sont les corps solides qui offrent les actions les plus vives. Les sels des métaux des deux premières sections sont en général les plus actifs; ceux des métaux des autres sections le sont fort peu; cependant quelques composés d'argent, de plomb, de cadmium, de zinc donnent une émission de lumière bien marquée. Mais, sous ce rapport, les composés d'uranium doivent être rangés parmi ceux dont l'action est la plus vive, ainsi que la plupart des platino-cyanures alcalins. Il n'y a donc aucune règle générale à établir quant à la composition des substances très-impressionnables.

Les substances organiques et les composés à bases organiques sont pour ainsi dire presque tous lumineux, quoique les effets qu'ils présentent soient de faible intensité, si ce n'est pour quelques-uns comme pour le bisulfate de quinine.

Les liquides n'ont pas offert une émission lumineuse appréciable dans le phosphoroscope. Cependant ils peuvent présenter des effets de phosphorescence de ce genre, puisque la dissolution du bisulfate de quinine, comme on le verra plus loin, est très-lumineuse dans la partie ultra-violette du spectre, ainsi que les dissolutions de chlorophylle, d'esculine et d'un certain nombre de matières organiques; mais la durée de la persistance des impressions lumineuses sur ces dissolutions est beaucoup plus courte qu'avec les corps solides, puisqu'avec le phosphoroscope décrit plus haut on n'a pu accuser d'effet de lumière et qu'il faut l'action continue des rayons violets pour les distinguer.

Quant aux gaz (1) (sauf dans des circonstances spéciales), ils ne donnent pas lieu à une émission de lumière propre après l'insolation.

L'état solide est donc celui sous lequel les corps donnent lieu en général aux effets de persistance d'impression lumineuse ; cependant, suivant la nature des corps, quand ils sont à l'état liquide ou dissous ils peuvent être actifs ou inactifs. On peut citer à ce sujet les exemples suivants : la potasse, les sels d'urane cristallisés sont lumineux dans le phosphoroscope ; leurs dissolutions ne donnent plus aucun effet appréciable. D'un autre côté, la chlorophylle n'est active dans la partie ultra-violette du spectre qu'à l'état de dissolution. Le bisulfate de quinine, au contraire, donne les mêmes effets à l'état solide ou en dissolution dans l'eau.

L'action de la chaleur sur le pouvoir que possèdent les corps d'émettre temporairement de la lumière après

(1) Voir *Annales de chimie et de physique*, 3e série, tome LVII, page 108. J'ai montré dans ce mémoire que, parmi les gaz simples, l'oxygène raréfié, placé dans des tubes de verre, acquérait la faculté, après le passage des décharges d'un appareil d'induction, d'agir comme corps lumineux, c'est-à-dire que ce gaz devenait phosphorescent après l'action de décharges électriques. J'ai dit également que des gaz mélangés à l'oxygène pouvaient augmenter cet effet, peut être en raison d'actions chimiques concomitantes.

Depuis cette époque on a annoncé que l'oxygène seul ne devenait pas lumineux, mais qu'il était nécessaire de le mélanger à d'autres gaz. Je viens de m'assurer, par des expériences précises, que si des mélanges de gaz donnent des effets persistants beaucoup plus marqués que l'oxygène, néanmoins ce dernier gaz pur et sec, obtenu au moyen du chlorate de potasse et après son passage sur de la potasse caustique, devient lumineux seul après l'action des décharges électriques. J'ai reconnu que, dans un ballon successivement rempli d'air raréfié et d'oxygène raréfié, l'air n'avait qu'une persistance à peine appréciable, tandis que celle de l'oxygène était bien manifeste quoique de courte durée. J'ai pu reproduire cet effet dans le même ballon à cinq ou six reprises différentes. En employant une disposition qui se rapproche de celle du phosphoroscope, l'effet est plus facile à saisir.

l'insolation se fait sentir inégalement sur chacun d'eux. Non-seulement la réfrangibilité de la lumière émise change plus ou moins pendant que le corps se trouve soumis à l'influence d'une température élevée, et plus loin nous en donnerons un exemple remarquable, mais encore les effets lumineux tendent à diminuer d'intensité et même à cesser à partir d'un certain degré de température, différent pour chacun d'eux; il semble que les causes qui tendent à écarter les molécules les unes des autres affaiblissent cette propriété.

Quelques corps, comme le spath d'Islande, donnent peu de changements depuis la température ordinaire jusqu'au rouge : si l'on choisit un fragment de spath d'Islande de la variété prismatique et qui donne une belle teinte orangée dans le phosphoroscope, on trouve que cette teinte devient un peu plus verdâtre à mesure que la température s'élève et au rouge naissant à peine si l'intensité semble diminuée ; en revenant à la température ordinaire, la nuance redevient orangée.

Ce corps, du reste, présente une particularité assez curieuse : on sait (Voir troisième mémoire, *Annales de chimie et de physique*, t. LVII, p. 38 et suivantes) que certains échantillons de chaux carbonatée, comme les cristaux inverses, de même que l'arragonite, paraissent lumineux verts assez vivement dans le phosphoroscope, et que cette lumière verte offre pour ainsi dire un second effet lumineux du carbonate de chaux, différent de celui que présente le spath rhomboédrique ; à une température qui n'est pas élevée et ne dépasse pas beaucoup 100°, toute émission de rayons verts cesse et le corps reste inactif. Ainsi l'émission de rayons rouges orangés de courte durée persiste, et celle des rayons verts de longue durée est rapidement détruite d'une manière temporaire par l'action de la chaleur.

La chaux qui provient du spath d'Islande fortement calciné et qui est assez lumineuse, présente des effets analogues à ceux du carbonate de chaux orangé; elle devient verdâtre près de la température rouge sombre, sans diminuer sensiblement d'activité. Ainsi la combinaison de cette substance avec l'acide carbonique ne paraît pas modifier les effets de persistance que la lumière exerce sur elle.

Le spath fluor (fluorine verte très-lumineuse), préalablement calciné, ne perd pas sensiblement d'activité lorsqu'on élève sa température jusque près du rouge sombre; sa nuance seule est un peu différente, car la teinte bleue foncée qui se manifeste à l'aide du mouvement lent du phosphoroscope devient seule plus faible; les teintes jaunes et vertes conservent à peu près la même intensité.

Un grand nombre de corps, contrairement aux précédents, deviennent tout à fait inactifs sous l'action de la chaleur vers 300 ou 400°; je citerai notamment l'alumine, soit précipitée et calcinée, soit à l'état de corindon, qui donne une lumière de moins en moins vive, mais toujours de même teinte, à mesure que la température s'élève; le verre ordinaire, le verre d'urane, etc., sont dans le même cas.

La chaleur ne donne pas lieu seulement à une action temporaire sur les corps, mais elle peut encore produire des modifications permanentes; en général son action préalable augmente l'activité permanente des corps. Les effets que l'on observe avec l'alumine et la chaux, et que je vais indiquer, montrent bien quelle est la limite de cette influence :

Lorsque l'alumine est précipitée à l'état de gelée et est hydratée, elle ne donne pas sensiblement lieu à une émission de lumière ou du moins l'on observe seulement une faible lueur verdâtre dans le phospho-

roscope. Si on la calcine à une température élevée, dans un fourneau à vent, elle acquiert le pouvoir d'émettre de la lumière rouge, mais, dans cet état, son action est assez faible.

Si l'on choisit au contraire de l'alumine très-pure et provenant de l'alun ammoniacal, et que l'on divise cette alumine en plusieurs parties, on peut, en la combinant avec des acides purs, faire du sulfate, de l'azotate, de l'acétate, de l'oxalate et d'autres sels à base d'alumine. En calcinant alors séparément dans un même fourneau à vent ces différents sels, ils donnent tous de l'alumine, mais qui est inégalement active. Celle qui provient du sulfate est toujours moins lumineuse que celle qui provient de l'acétate ou du nitrate, dont l'éclat approche de celui que donnent les rubis les plus brillants. Cependant, ces divers échantillons sont également purs, et on ne peut y supposer que des états moléculaires différents; il est remarquable de voir que la difference due à ce que divers composés d'alumine servent à la préparation de cette matière, persiste même après l'action d'une température très-élevée et prolongée pendant longtemps.

On trouve parmi les corindons naturels des différences également très-grandes; ils sont pour ainsi dire tous lumineux, mais les rubis le sont plus vivement que les saphirs ou que les corindons légèrement verdâtres qui contiennent du fer. Cependant, lorsque les corindons limpides et incolores sont à peine lumineux, il suffit de les porter probablement à une température très-élevée, pour augmenter ensuite leur activité lumineuse.

On ne peut pas dire que l'émission de la lumière de l'alumine ou des corindons soit due à une matière étrangère mélangée à ces corps, car il faut remarquer que si l'intensité de la lumière émise est variable, la

composition de cette lumière reste toujours la même. D'un autre côté, comme on le verra plus loin, le rapport du pouvoir émissif de cette matière à sa capacité pour la lumière, est sensiblement la même pour l'alumine préparée chimiquement aussi pure que possible et pour les corindons naturels, et il n'est pas possible de supposer que la substance étrangère qui serait mélangée à l'alumine serait toujours la même, quelle que fût la provenance des corindons naturels ou quel que soit le mode de préparation que l'on puisse employer.

La chaux donne lieu à des effets du même genre que ceux présentés par l'alumine. J'ai montré que l'arragonite, comme les cristaux de chaux carbonatée inverse, donne une émission de lumière verte persistante au lieu de présenter une teinte orangée. Si l'on calcine ces différents carbonates de chaux dans des creusets placés dans un fourneau à vent et que l'action de la chaleur soit suffisamment prolongée, ils sont complétement transformés en chaux. Ces échantillons ensuite sont tous lumineux orangés dans le phosphoroscope quand on en prend des fragments suffisamment minces mais avec des intensités bien inégales; celle qui provient de l'arragonite ne donne qu'une faible émission de lumière; celle qui provient des cristaux spathiques est au contraire très-lumineuse. D'un autre côté, la chaux ordinaire provenant de la calcination du calcaire compacte dans des fours à chaux n'est pas impressionnable d'une manière sensible; chauffée fortement dans un fourneau à vent, elle présente une faible émission de lumière orangée; la chaux provenant de la calcination du nitrate se comporte de même.

D'autres substances, comme la magnésie, présentent des effets analogues.

Quant aux corps impressionnables que l'on peu préparer à basse température par voie de cristallisation, sans que l'eau de cristallisation influe sur les effets lumineux, ils ne donnent pas plus de variations dans l'intensité que dans la composition de la lumière emise, et ils se présentent toujours identiques à eux-mêmes; cela est facile à concevoir. Tel est le cas des sels d'urane, des platino-cyanures cristallisés, du bisulfate de quinine, etc., mais les corps dont les formes cristallines sont modifiées lors de la cristallisation par suite de circonstances qui échappent souvent aux observations, ils présentent par cela même des variations dans l'action qu'ils exercent sur la lumière.

2° Composition de la lumière émise.

Les corps solides étant lumineux d'une manière continue dans le phosphoroscope, il est facile d'analyser la lumière qu'ils émettent, comme on analyse celle d'une source lumineuse quelconque : il suffit de placer à une certaine distance un prisme en flint ou en sulfure de carbone, et d'examiner, à l'aide d'une lunette, l'image prismatique d'une étendue du corps ayant une très-petite largeur, afin de séparer les rayons de différentes réfrangibilités qu'il émet. On peut en outre placer entre le prisme et le corps une lentille cylindrique qui donne à l'image l'apparence d'une ligne lumineuse très-brillante que l'on regarde directement au travers du prisme à l'aide de la lunette, et qui donne un spectre suffisamment net.

On reconnaît, à l'aide de ce mode d'expérimentation, que chaque corps a son action propre. On voit dans les images prismatiques des lignes brillantes, d'autres noires et des espaces ou bandes obscures comme lors-

qu'on étudie les lumières artificielles ordinaires; et même ces lignes ou ces bandes obscures peuvent servir à spécifier la composition ou l'état physique du corps. Ainsi l'alumine donne plusieurs lignes brillantes rouges avec des lignes noires. L'aluminate de magnésie, le silicate d'alumine, la topaze, bien que donnant une émission lumineuse de même nuance, offrent des images prismatiques différentes. Quant aux composés d'urane, ils présentent une série de lignes brillantes équidistantes remarquables qui ne sont pas placées à la même distance dans chaque combinaison (1).

Je dois insister sur l'existence de ces raies noires qui sont surtout très-tranchées en se servant de corindons rubis et de spinelle. En effet, dans cette circonstance, la lumière émise par ces corps en vertu de leur action propre ne traverse que la faible couche d'air qui les sépare de l'observateur ainsi que les verres des lunettes avec lesquelles on les observe; il faut donc, si ces raies sont dues à une absorption de rayons, que cette absorption ait lieu dans l'épaisseur même de la couche solide d'où émane la lumière. En tout cas, l'on voit que d'autres causes que celle de l'absorption de la lumière au travers de matières gazeuses ou de vapeurs incandescentes peut donner lieu à des raies noires dans les images prismatiques et il ne serait pas impossible que certaines des raies noires observées dans le spectre de la lumière du soleil et dans ceux des étoiles ne provinssent pas des atmosphères gazeuses qui environnent ces astres.

Un fait très-curieux et que présente un certain nombre de corps, c'est que des rayons de diverses

(1) Voir *Annales de chimie et de physique*, tome LV, page 54 et suivantes.

couleurs et de durées inégales peuvent être émis simultanément. Le phosphoroscope seul peut servir à mettre ce fait en évidence; ainsi la plupart des diamants, qui paraissent jaunes avec une faible vitesse de rotation des disques de l'appareil, passent en général au bleu avec une vitesse plus grande. Le bisilicate de chaux (vollastonite), qui est orangé avec une faible vitesse de l'appareil, devient vert quand le mouvement de rotation s'accélère. Le fluorure de calcium (chlorophane verte) présente trois changements de nuance, suivant la vitesse de l'appareil; d'abord bleu foncé avec une faible vitesse, il devient ensuite orangé, puis vert. Ces effets lumineux différents existent ensemble et ne se produisent pas successivement; ils n'apparaissent les uns après les autres dans le phosphoroscope qu'en vertu de l'inégale persistance des rayons émis.

L'emploi du phosphoroscope seul, avons-nous dit, met le fait en évidence; mais si l'on examine les images prismatiques pour reconnaître la réfrangibilité de la lumière émise, l'effet devient plus démonstratif et l'on voit des parties différentes de ces images apparaître ou disparaître, suivant la vitesse de rotation des disques.

On reconnaît également qu'il n'y a aucun rapport entre la réfrangibilité des rayons émis et la persistance plus ou moins grande de ceux-ci; tantôt ce sont les rayons les plus réfrangibles dont l'effet est le plus prolongé (carbonate et bisilicate de chaux, etc.), tantôt le contraire a lieu (diamant, bisulfate de quinine, platino-cyanure de potassium, etc.).

On vient de voir que la composition chimique des corps avait une influence prédominante sur la composition de la lumière émise. Cependant, dans certaines circonstances, l'état physique peut exercer une action

aussi puissante. On peut citer comme exemples les effets remarquables que présentent les sulfures alcalino-terreux ou phosphores artificiels. Le temps que je puis consacrer à cette séance ne me permet pas d'entrer dans des détails circonstanciés au sujet de la manière dont on les obtient; mais je puis dire que, d'après le mode de préparation adopté, on a pu les avoir beaucoup plus lumineux qu'on ne les avait obtenus antérieurement et les préparer à coup sûr, de sorte que certains d'entre eux présentent à volonté, après l'influence préalable du rayonnement lumineux, une quelconque des nuances prismatiques (1). En outre, l'on a reconnu que quelques-unes de ces matières provenant de la combinaison du soufre avec différentes bases, donnent une émission lumineuse de même couleur que celle qui est donnée par les bases qui ont servi à les préparer. Parmi les faits qu'on peut citer, le suivant est un des plus curieux ; on sait que le spath d'Islande, dans le phosphoroscope, est lumineux orangé et l'arragonite très-pure, verte. Si on les mélange l'un et l'autre avec du soufre et qu'on les calcine, on obtiendra avec le premier corps un sulfure lumineux orangé, et avec le second un sulfure lumineux vert, c'est-à-dire des phosphores artificiels présentant les mêmes nuances que les carbonates de chaux qui ont servi à les obtenir. D'autres corps présentent des effets, non pas semblables, mais du même ordre.

Ainsi, dans quelques circonstances, la propriété physique ou le pouvoir particulier que possède un corps de donner une émission lumineuse de telle ou de telle nuance, se trouve conservé dans quelques-unes de ses combinaisons.

Ces résultats sont très-remarquables et montrent

(1) *Annales de chimie et de physique*, tome LV, page 25.

que les phénomènes de phosphorescence sont propres à révéler dans les corps des états moléculaires différents qui n'ont pu être appréciés par d'autres moyens.

Un fait qui vient montrer que l'état physique est bien la cause qui donne à ces corps la faculté d'émettre telle ou telle lumière, c'est que le sulfure de strontium obtenu par l'action directe du soufre sur la strontiane caustique à une température supérieure à 500°, et qui est lumineux violet par insolation lorsqu'on maintien sa température à — 20°, devient indigo à 0, puis bleu plus clair vers 25°, vert à 50 ou 60°, et enfin passe au jaune, puis à l'orangé vers 150°. Ainsi dans l'intervalle de — 20° à + 150° ce corps jouit temporairement de la faculté d'émettre une quelconque des principales couleurs du spectre après l'influence préalable du rayonnement lumineux, et cela sans aucune altération, car on peut indéfiniment reproduire les mêmes effets.

Ces substances, si l'on veut me permettre cette comparaison, sont donc, par rapport à la lumière, ce que les cordes vibrantes, différemment tendues, sont par rapport aux sons.

### 3° Intensité de la lumière émise.

Un corps placé dans le phosphoroscope présente, comme on l'a vu, des variations d'intensité lumineuse, suivant la vitesse de rotation de l'appareil ; il arrive un moment où un effet maximum est atteint, et cela a lieu quand il perd autant par rayonnement, qu'il reçoit pendant le passage successif des ouvertures. Si l'on évalue, à l'aide d'un photomètre, l'intensité de la lumière émise par le même corps placé dans l'appareil, lorsque les disques de celui-ci reçoivent des vitesses

différentes, mais toujours uniformes lors de chaque observation, ces intensités lumineuses correspondront à des intervalles de temps séparant l'instant de l'insolation du moment de l'observation, mesurés au moyen de la vitesse de rotation de l'appareil, et l'on pourra chercher quelle est la loi que suit l'extinction de la lumière du corps, et par suite celle qui règle son illumination.

On peut aisément faire cette comparaison au moyen d'un photomètre (1) dont j'ai donné la description, et qui est fondé sur les effets connus de la double réfraction, photomètre qui permet de comparer l'intensité lumineuse d'un corps placé dans le phosphoroscope avec celle d'une lampe ou d'une source lumineuse quelconque.

On arrive ainsi à connaître qu'elle est l'intensité de la lumière émise à chaque instant par un corps insolé qui vient d'être subitement rentré dans l'obscurité et cela à divers intervalles de temps très-courts, depuis l'origine de l'extinction, bien que le temps de cette extinction ne dure souvent pas plus de $\frac{1}{1000}$ de seconde; si l'on n'avait pas le phosphoroscope pour rendre continue l'observation de ces effets, la solution de ce problème n'aurait pas été possible.

Le premier fait que l'on constate en suivant cette marche, c'est qu'avec un même corps et en se plaçant à une limite telle que la vitesse de rotation du phosphoroscope donne le maximum d'action, l'intensité de la lumière émise est proportionnelle à l'intensité de la lumière active, et cela lorsque l'intensité de la lumière active varie de 1 à 110 fois, l'intensité de la lumière solaire incidente.

(1) Voir *Annales de chimie et de physique*, 3e série, tome LXII, page 13.

Si l'on cherche ensuite quels sont les effets donnés par un même corps lorsque, l'intensité lumineuse étant constante, la vitesse de rotation du phosphoroscope est variable, c'est-à-dire lorsque le temps qui sépare le moment de l'insolation de l'instant de la vision est différent, on trouve des résultats qui peuvent être plus ou moins compliqués, suivant les corps que l'on étudie. Il est nécessaire pour cela d'entrer dans quelques détails :

Une fois un corps impressionné, la rapidité d'émission des rayons qui en émanent doit dépendre de son pouvoir émissif et de sa capacité (pouvoir émissif et capacité relatifs aux effets lumineux particuliers dont il s'agit ici) ; mais un certain nombre de corps émettant des rayons de durée inégale, soit de même nuance, soit de couleur différente, doivent présenter des effets complexes, puisque la capacité et le pouvoir émissif varient dans le même corps, pour ces divers rayons. Néanmoins, avec le plus grand nombre de corps, on n'observe pas de changements de couleur dans le phosphoroscope, ou du moins un des effets lumineux, domine tellement les autres que la détermination des intensités lumineuses se fait comme si les couleurs ne changeaient pas pendant l'expérience.

On supposera, dans ce qu'on va dire, que les corps sont impressionnés par la lumière blanche du soleil et qu'ils émettent, pendant leur extinction, des rayons de même couleur quoique d'une nuance différente de celle des rayons actifs.

On a trouvé que lorsque les corps remplissent les conditions précédentes, et quand l'émission des rayons perceptibles est de courte durée et inférieure en général à une seconde de temps, la loi suivant laquelle s'effectue la déperdition de la lumière est telle que la différence

entre les logarithmes des intensités lumineuses prises à des temps différents depuis l'origine de l'extinction est sensiblement proportionnelle à la différence de ces mêmes temps, et cela quelle que soit l'intensité de la lumière excitatrice. Cela signifie : 1° que la vitesse d'extinction est indépendante de l'intensité de la lumière incidente et proportionnelle à l'intensité de la lumière émise; 2° que la loi qui règle l'extinction du corps est la même que celle du refroidissement des corps échauffés quand les différences de leur température sur celle de l'air ambiant sont assez petites.

D'après ces résultats, si $i_o$ désigne l'intensité lumineuse d'un corps impressionnable à l'instant où il commence à émettre de la lumière dans l'obscurité, $i_t$ l'intensité lumineuse après un temps $t$, $a$ un nombre proportionnel au rapport du pouvoir émissif à la capacité du corps pour la lumière, on a

$$i_t = i_o e^{-at},$$

$e$ étant la base des logarithmes Nepériens.

Les expériences faites avec les différents corps qui vont être cités plus loin vérifient sensiblement cette hypothèse.

Non-seulement le nombre $a$ reste constant avec le même corps, mais les déterminations faites avec l'alumine ont montré qu'il restait également à peu près le même, quel que soit l'état moléculaire de cette matière, qu'elle soit cristallisée, fondue ou pulvérulente, et bien que l'intensité maximum de la lumière émise à l'origine de l'extinction soit bien différente. Cette remarque est très-importante, car elle montre que la nature du corps exerce seule une influence sur la loi du décroissement de la lumière, et que le rapport du pouvoir émissif à la capacité du corps doit rester con-



stant, de même que la composition de la lumière émise reste constante, ainsi que je l'ai prouvé. Ces résultats, joints à ceux qui ont été rapportés antérieurement, prouvent donc que les effets lumineux produits par les corps sont des effets dépendant de l'état moléculaire de ceux-ci et ne proviennent pas de substances qui y seraient mélangées.

Si l'on admet que la formule indiquée ci-dessus représente d'une manière satisfaisante l'intensité lumineuse d'un corps après des temps différents depuis l'origine de l'extinction, on pourrait en conclure la quantité totale de lumière émise par le corps lumineux, quantité qui est égale à celle qu'il a reçue et qui mesure par conséquent la somme d'action communiquée au corps par l'agent lumineux. Il faut admettre toutefois que ce corps a une dimension très-petite et que le passage de la lumière qui a pénétré à une certaine profondeur au travers de la couche superficielle du corps ne modifie pas l'intensité de la lumière émise. D'après cette supposition, cette quantité de lumière Q serait donnée par l'intégrale de la différentielle $i_t\,dt$ prise depuis $t = o$ jusqu'à $t = \infty$, et qui se trouve être égale à $\frac{i_0}{a}$.

Du reste, cette quantité $a$ donne également la mesure de la comparaison des temps nécessaires pour que des corps soumis à l'insolation sous l'action permanente de la lumière, arrivent à leur maximum d'effet; car ce temps, pour chaque corps, est, sans erreur bien grande, proportionnel à $\frac{1}{a}$ (1). Or, comme on va le voir, depuis les sels d'urane jusqu'au carbonate de chaux, ce nombre $a$ varie de 1,5 à 0,005 en prenant le

(1) Voir *Annales de chimie et de physique*, 3[e] série, tome LXII, page 52.

millième de seconde pour unité de temps ; on voit donc que $\frac{1}{a}$ variera dans le rapport de 1 à 300, et s'il ne faut qu'une très-petite fraction de seconde pour que le calcaire, soumis à l'action directe des rayons solaires, atteigne son maximum d'effet, il ne faudra, à plus forte raison, qu'un temps 200 ou 300 fois plus petit pour les sels d'urane. Pour les platino-cyanures et le bisulfate de quinine, ce temps serait encore moindre.

Je vais indiquer la valeur de $a$, ou du rapport du pouvoir émissif à la capacité d'un certain nombre de substances placées dans le phosphoroscope, lesquelles ont vérifié sensiblement l'expression ci-dessus indiquée :

| CORPS IMPRESSIONNABLES. | Valeur du coefficient $a$, l'unité de temps étant le millième de seconde. | OBSERVATIONS |
|---|---|---|
| Uranite naturelle | 1,4975 | La lumière émise est de teinte verte. |
| Carbure d'hydrogène (à teinte des sels d'urane) | 1,4363 | Id. |
| Double sulfate d'urane et de potasse | 1,3869 | Id. |
| Double sulfate d'urane et de chaux | 0,8206 | Id. |
| Perchlorure d'uranium et de potassium | 0,7682 | Id. |
| Verre d'urane | 0,5546 | Id. |
| Azotate d'urane | 0,4207 | Id. |
| Double fluorure de potassium et d'uranium | 0,3256 | Id. |
| Verre (crown ordinaire) | 0,0436 | Id. |
| Chaux phosphatée violette | 0,0263 | Id. |
| Topaze jaune transparente | 0,5546 | La lumière émise est rouge. |
| Silicate d'alumine (disthène) | 0,2295 | Id. |
| Alumine | 0,0791 | Id. |
| Aluminate de magnésie (spinelle) | 0,0094 | Id. |
| Leucophane | 0,0147 | La lumière émise est orangée. |
| Carbonate de chaux (spath d'Islande) | 0,00507 | Id. |

Les limites de 1,5 à 0,005 ne comprennent que les

corps dont on peut évaluer les actions dans le phosphoroscope décrit plus haut; mais au-dessous du carbonate de chaux se trouvent placés les corps à plus grande persistance, et au delà de l'uranite les substances telles que les platino-cyanures et certaines matières organiques.

En réalité, on ne peut affirmer que l'exponentielle indiquée plus haut $i_t = i_0 e^{-at}$ soit l'expression exacte de la loi de déperdition de la lumière en vertu de l'action propre des corps, et par suite celle qui règle l'illumination de ces mêmes corps, mais on peut la regarder comme une formule empirique rendant suffisamment compte des expériences, et cela quand l'intensité lumineuse active varie entre 1 et 110 fois celle de la lumière solaire incidente.

Lorsque les corps impressionnables, rentrés subitement dans l'obscurité, passent successivement par différentes teintes, c'est-à-dire que les rayons émis différemment réfrangibles ont des durées inégales, comme le diamant, le fluorure de calcium, le bisilicate de chaux, etc., en sont des exemples; ou bien lorsque l'émission lumineuse offre une certaine durée et dépasse une seconde de temps (exemples, sulfures alcalino-terreux, etc.), la loi précédente ne peut plus s'appliquer. Il est possible que la différence qui existe entre les résultats observés et ceux que l'on déduirait du calcul d'après la loi énoncée plus haut tienne à ce que les rayons différemment réfrangibles, et même les rayons de semblable couleur émis par les corps, aient des durées inégales et, par conséquent, des vitesses d'extinction différentes. En tout cas, entre certaines limites, les résultats des expériences sont assez bien représentés par une expression empirique simple de la forme

$$i^m (t + c) = c,$$

$i$ représentant l'intensité de la lumière émise après un temps $t$, celle qui est émise à l'origine de l'extinction étant représentée par 1 ; $c$ est un coefficient qui peut recevoir différentes valeurs dans le cours d'une même expérience, et $m$ un exposant qui varie entre 0,5 et 1.

D'après cela, les substances qui donnent une émission lumineuse de longue durée offrent une vitesse de déperdition de la lumière qui varie plus rapidement avec l'intensité de cette lumière que les corps dont la persistance est de courte durée, et cette vitesse est sensiblement proportionnelle à une puissance de l'intensité lumineuse comprise entre $\frac{3}{2}$ et 2. On ne peut expliquer la longue durée pendant laquelle brillent ces substances que parce qu'elles reçoivent de la part de la lumière extérieure une plus grande somme d'action que les corps qui s'éteignent avec rapidité.

Les résultats des expériences faites avec les corps qui émettent pendant très-longtemps de la lumière dans l'obscurité, permettent de montrer de quelle merveilleuse faculté l'organe de la vision est doué, et quel est le peu d'intensité des plus faibles lueurs qu'il puisse comparer et de celles qu'il peut distinguer : si l'on prend comme terme de comparaison l'intensité de la lumière solaire quand cet astre est le plus élevé sur l'horizon, à l'époque du solstice d'été, et que le ciel est pur, on trouve alors que le sulfure de strontium lumineux vert, rentré subitement dans l'obscurité après avoir été exposé aux rayons solaires, émet des rayons lumineux de moins en moins intenses et qui peuvent encore être comparés à une lumière artificielle après 1 h. 30 m.; au bout de ce temps, l'intensité des rayons émis est à celle des rayons solaires incidents, à surface égale, comme $1 : 10^{11}$. Passé ce terme, les comparaisons directes deviennent impossibles ; mais on continue encore à percevoir de la lumière dans l'obscurité

pendant plus d'un jour, bien que pendant cet intervalle de temps l'intensité des rayons émis par le corps ait toujours été en diminuant. On peut néanmoins, à cet instant, évaluer approximativement la faible intensité des rayons émis : si l'on suppose que les rayons solaires soient atténués de façon à ne plus avoir que la millionième partie de leur intensité primitive, dans cet état ils seraient dix millions de fois plus intenses que les lueurs qui sont encore distinctes après un séjour de 30 heures du sulfure de strontium dans l'obscurité; l'intensité est alors, à celle de la lumière solaire primitive, comme $1 : 10^{13}$. Le corps reste encore lumineux après ce temps, mais il est impossible de pouvoir suivre d'une manière certaine les changements qu'il présente ultérieurement.

Ces résultats montrent combien on peut aller loin dans l'étude de la lumière émise par les corps, même lorsque les effets sont très-faibles, et entre quelles limites éloignées l'organe de la vision est impressionnable et peut comparer les effets qu'il perçoit.

On a supposé jusqu'ici que les rayons lumineux excitateurs tombaient perpendiculairement à la surface des corps; mais si les rayons sont plus ou moins inclinés, alors l'intensité des rayons réfléchis et transmis variant suivant les lois connues, les effets lumineux produits par les corps après l'insolation varient proportionnellement entre les mêmes limites. Ces résultats prouvent qu'il ne suffit pas que la lumière tombe sur la surface d'un corps pour l'impressionner, mais qu'il est nécessaire qu'elle pénètre à une certaine profondeur dans ce corps pour mettre en vibration ses molécules.

On voit que j'ai pu aborder, pour ces actions spéciales, des questions analogues à celles qui règlent le

refroidissement et les quantités de chaleur absorbées ou émises par les corps.

### 4° Influence de la réfrangibilité de la lumière incidente.

On a supposé, dans l'étude des effets précédents, que les corps impressionnables étaient excités par des rayons de lumière solaire blanche; voyons quels sont les effets qui ont lieu quand on emploie des rayons d'une réfrangibilité déterminée. Si le faisceau des rayons incidents reste le même, et qu'on place successivement dans le phosphoroscope divers corps, on ne trouve *aucun rapport entre la réfrangibilité de la lumière émise et celle de la lumière incidente*. Ainsi, par exemple, l'alumine émet de la lumière rouge quels que soient les rayons qui l'excitent, que ce soit les rayons violets, bleus ou verts; le spath d'Islande est orangé sous l'action de ces mêmes rayons violets, bleus ou verts, etc. Mais si en conservant la même substance impressionnable l'on fait tomber successivement sur elle les différents rayons colorés dont se compose la lumière blanche, on trouve que cette substance n'émet que des rayons d'une réfrangibilité *au plus égale et en général moindre que celle des rayons actifs*. Ainsi, par exemple, une substance excitée par les rayons bleus du spectre solaire pourra donner lieu à une émission de rayons bleus, verts, jaunes, etc., mais non à des rayons violets qui sont plus réfrangibles que les bleus; cette même substance, excitée par les rayons jaunes, ne pourra donner lieu qu'à une émission de rayons jaunes orangés ou rouges; s'il est impressionné par le rouge, il ne peut présenter d'autre couleur que cette dernière.

Si l'on place donc dans le phosphoroscope un corps qui émet à la fois des rayons de toutes réfrangibilités quand il est excité par la lumière blanche, telle que la

potasse ou le verre ordinaire, on verra que ces corps étant excités par des rayons incidents variant du violet au rouge du spectre, deviendront de plus en plus rouges par la disparition successive des rayons plus réfrangibles que les rayons actifs.

On est ainsi conduit à cette conclusion importante *que la longueur d'onde des rayons émis par un corps en vertu de son action propre est toujours plus grande et au plus égale à celle des rayons incidents;* c'est-à-dire que des vibrations d'une vitesse déterminée ne peuvent exciter que des vibrations de même vitesse ou de vitesse moindre, mais non pas d'une vitesse plus grande.

Les limites de réfrangibilité entre lesquelles les corps sont impressionnables, c'est-à-dire les longueurs du spectre solaire actif, dépendent de la nature et de l'état moléculaire des corps. On conçoit, d'après ce qui vient d'être dit, que ces limites sont en général d'autant plus étendues que la lumière émise par le corps a une réfrangibilité moindre (exemples : alumine et aluminate de chaux), sans cependant qu'il y ait de règle fixe à cet égard. D'un autre côté, les spectres des rayons actifs peuvent présenter plusieurs maxima d'action, comme le prouvent le phosphate de chaux et la leucophane.

En général, les rayons les plus actifs sont les rayons les plus réfrangibles, c'est-à-dire les rayons bleus et violets du spectre et même extra-violets. Ce sont également ces rayons qui donnent lieu, en général, aux effets chimiques les plus énergiques lorsqu'ils agissent sur des corps chimiquement impressionnables. Rien n'est plus propre à le démontrer que l'emploi du phosphoroscope, puisque l'on peut placer cet appareil dans les différentes parties d'un spectre lumineux très-intense.

On peut également faire usage des sulfures alcalino-terreux ou phosphores artificiels que l'on rend actifs

dans le bleu, le violet et l'extra-violet, et nullement dans la partie la plus lumineuse de l'image prismatique. Le moyen le plus simple pour observer les effets produits sur les sulfures alcalino-terreux consiste à fixer ces phosphores, préalablement réduits en poussière, avec un peu de gomme arabique entre deux lames de verre ou sur du papier ou du carton, et à projeter sur ces surfaces l'image prismatique; on reconnaît au bout de peu d'instants quelles sont les régions du spectre solaire qui impressionnent la substance sensible avec laquelle on opère.

En général, les parties du spectre solaire dans lesquelles les effets sont observés varient avec ces dernières substances sensibles et ne dépassent guère la raie F du côté du rouge; elles s'étendent de l'autre côté, bien au delà du violet, et plus ou moins loin, suivant les substances. On observe également un ou deux maxima d'action, suivant les préparations, de sorte que l'image lumineuse qui apparaît sur la surface après l'action du spectre est continue ou bien présente une bande obscure plus ou moins large (1).

Si l'on impressionne à la lumière diffuse ou solaire toute la surface impressionnable recouverte de sulfure phosphorescent et qu'on vienne à y projeter rapidement un spectre très-intense, au bout de plusieurs secondes, en fermant l'ouverture du volet et en examinant la surface, on trouve qu'elle est restée lumineuse, excepté à l'endroit frappé par la partie verte, jaune et rouge du spectre, et que, dans les parties les plus réfrangibles où le rayonnement excite la phosphorescence, l'intensité de la lumière émise a augmenté; mais depuis cette dernière partie jusque bien au delà du rouge et dans toute la région frappée par

(1) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, tome LV, page 62.

les rayons les moins réfrangibles, la surface est devenue complétement obscure. Cet effet prouve que cette partie du spectre détruit la phosphorescence.

Mais cette destruction (1) ne s'opère pas en rendant immédiatement obscure la matière phosphorescente, et si l'on fait usage de substances éminemment lumineuses, que l'on opère rapidement et que le spectre n'agisse que pendant une fraction de seconde ou une seconde même, toute la partie frappée par le spectre, depuis l'extrême rouge jusqu'au delà du violet, paraît lumineuse; ce n'est donc qu'en prolongeant l'action du spectre pendant plusieurs secondes que la partie la plus réfrangible est devenue obscure. Ces résultats prouvent que les rayons qui détruisent la phosphorescence sur les sulfures alcalino-terreux agissent à la manière de la chaleur et font rendre aux corps lumineux pendant un espace de temps de courte durée toute la somme de lumière qu'ils auraient émise plus lentement dans l'obscurité.

Un troisième genre d'effets a lieu lors de l'action des parties violettes et extra-violettes du spectre sur les matières phosphorescentes, et principalement sur les sulfures de strontium, de barium et de calcium. Je l'ai observé en 1843, il y a plus de dix-huit ans, et voici comment il se trouve rapporté dans l'un des premiers mémoires que j'ai publiés sur ce sujet (2) : « Un fait que j'ai souvent observé dans le cours de ces expériences, c'est que, lorsque le spectre solaire frappe une substance telle que le sulfure de calcium phosphorescent, pendant son action, le papier sur lequel est déposée cette substance paraît lumineux, non-seulement de A en H, mais encore jusqu'en P, de sorte qu'on peut

(1) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, tome XXII, page 344.
(2) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, tome IX, page 320.

voir toutes les raies du spectre de A en P dessinées par projection. »

On doit notamment citer le sulfure de strontium lumineux vert et le sulfure de barium lumineux orangé comme offrant, sous ce rapport, la lumière la plus vive dans la partie extra-violette de l'image prismatique pendant l'action continue du spectre sur eux. La première substance même donne lieu à un effet très-curieux qui montre qu'un même corps peut émettre des rayons de même couleur mais de durée bien inégale : lorsqu'elle est préparée dans des conditions convenables, et que sa couleur propre, vue par diffusion à la lumière du jour, est jaune soufre, elle donne une belle lumière verte depuis la ligne G de l'indigo jusqu'en P, bien au delà du violet, pendant que les rayons lumineux l'impressionnent; mais au moment où l'on fait cesser l'action du spectre solaire et où la surface impressionnable se trouve subitement dans l'obscurité, on ne voit plus que deux taches lumineuses vertes, l'une correspondant à GH, l'autre à IP, de sorte que l'intervalle HI est obscur. Or, comme cet intervalle est lumineux de même nuance pendant l'action continue du spectre, il faut nécessairement que les rayons émis dans ce dernier cas aient une durée très-courte, et que, suivant les parties actives du spectre, la substance dont il s'agit émette des rayons de même couleur, mais de durée inégale.

A l'époque où j'observai ces phénomènes, je les avais attribués à un effet de phosphorescence instantanée, pour ainsi dire, sans pouvoir démontrer nettement l'émission lumineuse, comme lorsque la persistance des impressions lumineuses était plus grande.

C'est une action du même genre qui se produit quand on place les sels d'urane, le bisulfate de quinine, l'esculine et un certain nombre d'autres corps dans les

rayons violets et extra-violets du spectre. M. Brewster(1) est le premier qui ait étudié les effets de coloration particuliers que présentent certaines substances, comme le spathfluor, des dissolutions organiques, etc., quand on les éclaire de diverses manières; en 1845(2), M. John Herschel chercha à expliquer ces effets en admettant qu'il se produisait à la surface de certains corps une diffusion qu'il nomma diffusion épipolique. En 1852, M. Stokes(3) analysa de nouveau ces phénomènes et crut pouvoir les expliquer en les rapportant à une nouvelle propriété de la lumière. D'après ce physicien, certains rayons lumineux, en tombant sur les corps qui donnent lieu à ces effets de coloration, changent de réfrangibilité, c'est-à-dire de longueur d'onde, et donnent lieu à une diffusion différente de celle qui se produit dans les conditions ordinaires; cette diffusion avait reçu depuis le nom de fluorescence. Bien que cette explication doive être abandonnée aujourd'hui, ainsi que la dénomination de fluorescence, car on va voir que les effets dont il s'agit ne sont autres que des effets de phosphorescence, il résulte néanmoins de l'étude attentive faite par M. Stokes, que les rayons émis par les corps rendus lumineux dans les conditions dont il s'agit, sont dans des conditions différentes de celles des rayons incidents, et ont toujours une longueur d'onde plus grande que celle de ces derniers rayons, résultat analogue à celui auquel j'ai été conduit depuis par l'observation des phénomènes de phosphorescence.

Aussitôt après la publication de ces mémoires, je ne

(1) *British ass. for the advancement of science*, 1838. *Annales de chimie et de physique*, 3e série, tome XXXVIII, page 376.

(2) *Philos. transact.*, 1845, pages 143 et 145. *Annales de chimie et de physique*, tome XXXVIII, page 378.

(3) *Philos. transact.*, 1852, page 463. *Annales de chimie et de physique*, 3e série, tome XXXVIII, page 490.

doutai pas que les effets lumineux dont il était question ne fussent analogues à ceux dont j'ai parlé plus haut et qui se produisent lorsque les rayons violets et extra-violets viennent agir sur les corps phosphorescents, mais seulement pendant un temps très-court; mais comment démontrer l'émission lumineuse par un corps en vertu de son action propre et cela pendant un intervalle de temps très-petit? C'est en réfléchissant ainsi aux différents moyens propres à prouver l'identité des effets de fluorescence avec ceux de phosphorescence, que je fus conduit à la construction des phosphoroscopes dont j'ai parlé au commencement de cette séance.

Actuellement cette conclusion paraît tellement évidente qu'il est inutile d'insister longuement sur sa démonstration; les corps tels que le verre, les rubis, les spinelles, les diamants, le fluorum de calcium, les composés d'uranium, les platino-cyanures, qui donnent lieu à une émission lumineuse quand la lumière violette et extra-violette les frappe, donnent lieu à une émission de lumière semblable dans le phosphoroscope, alors qu'on les voit après l'action lumineuse; bien plus, si l'on analyse la lumière émise au moyen d'un prisme et d'une lunette comme on l'a vu plus haut, on trouve une composition identique dans les deux cas. Il n'y a que quelques dissolutions organiques qui ne paraissent pas visibles dans le phosphoroscope, ainsi qu'on l'a déjà dit (voir page 14), mais qui montrent seulement que le temps que l'on mesure est inférieur à celui pendant lequel ces corps conservent l'impression qu'ils ont reçue.

Ainsi il est bien prouvé que ces effets ne tiennent pas à une nouvelle propriété de la lumière, à une diffusion particulière comme le croyaient M. Herschel et M. Stokes, mais rentrent dans les effets de phospho-

rescence ou d'émission lumineuse par action propre des corps, puisqu'ils durent même après l'action de la lumière excitatrice.

On se rend compte aisément, d'après l'action excitée par les rayons les plus réfrangibles, des effets produits en se servant d'écrans en verre bleu foncé ou violet. Si les rayons solaires ou ceux qui émanent d'un appareil photo-électrique après avoir traversé un de ces écrans viennent tomber sur une surface en verre, ou en carton, enduite par places de bisulfate de quinine, de platino-cyanure, etc., on voit immédiatement les parties où se trouvent ces corps devenir lumineuses, de la même manière que s'ils étaient placés dans la partie extra-violette du spectre. Mais les rayons cessent-ils de frapper ces corps, comme la durée de la persistance des impressions lumineuses est fort petite, l'écran rentre presque instantanément dans l'obscurité. Si au lieu de ces matières on emploie des sulfures alcalino-terreux, non-seulement des effets lumineux analogues se produisent pendant l'action de la lumière, mais encore ils persistent dans l'obscurité pendant un temps plus ou moins long dépendant du degré de persistance des impressions lumineuses sur ces corps. Les expériences faites de cette manière avec des bandes ou des dessins obtenus au moyen de diverses matières fixées sur du verre sont très-frappantes.

On voit aussi que des lumières artificielles, principalement celles qui donnent lieu a une émission de rayons très-réfrangibles, sont très-actives. Tel est le cas de la lumière émise lors de la combustion du soufre dans l'oxygène et surtout de la lumière électrique, soit des étincelles ordinaires, soit de l'arc voltaïque, principalement quand cette lumière se produit dans l'air raréfié. Ainsi en plaçant sous le récipient d'une machine pneumatique des corps comme les

composés d'uranium, le spathfluor, une surface enduite de bisulfate de quinine, le sulfure de strontium lumineux vert, etc., aussitôt qu'à l'aide d'un appareil d'induction de Ruhmkorf on fait passer des décharges lumineuses entre les conducteurs qui pénètrent à l'intérieur de la cloche, on voit ces composés s'illuminer chacun avec la couleur qui leur est propre.

J'ai fait usage en 1858 d'une disposition particulière pour étudier les phénomènes de phosphorescence dus à l'action de la lumière électrique et qui consiste à appliquer à l'électricité le principe qui a servi de base à la construction du phosphoroscope; pour atteindre ce but on raréfie l'air à 1 ou 2 millimètres de pression dans des tubes de verre de 2 à 3 centimètres de diamètre environ et de 40 ou 50 millimètres de longueur et dans lesquels on a introduit préalablement les substances phosphorescentes soit en petits fragments, soit en poussière. Aux extrémités de ces tubes ont été soudés des fils de platine. Une pointe effilée et ménagée de côté sert à raréfier l'air dans le tube à l'aide d'une machine pneumatique et à sceller le tube quand le vide est fait. On peut alors faire passer au travers de ces tubes maintenus horizontalement des décharges électriques provenant soit d'une machine électrique ordinaire, soit d'une batterie, soit plus simplement d'un appareil d'induction de M. Ruhmkorf. La décharge d'une batterie donne un effet très-brillant, mais de courte durée, et ensuite la matière phosphorescente émet pendant un certain temps de la lumière suivant sa puissance de phosphorescence. Si l'on fait usage de la décharge continue d'une machine électrique ou d'un appareil d'induction, les rayons électriques qui traversent l'air raréfié du tube et ont une teinte violacée bien connu, en passant très-près de la surface des corps, excitent la phosphorescence au plus haut

degré; non-seulement après leur passage les substances phosphorescentes conservent pendant un certain temps la propriété de luire comme si on les eût exposées à la lumière solaire, mais encore pendant ce passage même elles sont lumineuses d'une manière continue, et cela avec une intensité d'autant plus grande que l'action électrique est plus énergique. Cet effet tient à ce que les matières étant excitées à chaque instant par les décharges qui se succèdent à des intervalles très-courts, émettent de la lumière non-seulement à l'instant où elles sont impressionnées, mais encore après; car la durée de l'impression que la lumière exerce sur eux est en général plus grande que l'intervalle qui sépare deux décharges consécutives : ce motif et la persistance des impressions lumineuses sur la rétine rendent continu l'effet perçu par l'observateur.

Il se manifeste donc, à l'aide de cette disposition, des effets analogues à ceux que l'on observe dans le phosphoroscope, si ce n'est que les décharges électriques remplacent les éclats intermittents que la lumière solaire produit en pénétrant dans cet appareil. En plaçant dans les tubes des sulfures alcalino-terreux très-impressionnables, on obtient pendant le passage des décharges électriques des effets lumineux des plus brillants et pour ainsi dire une quelconque des nuances prismatiques suivant la matière que l'on emploie; les sulfures de calcium orangé et bleu verdâtre, les sulfures de strontium vert et bleu donnent des effets d'une grande vivacité. On peut placer également dans l'intérieur des tubes des corps dans lesquels la durée de la persistance des impressions lumineuses ne subsiste que pendant un temps très-court, et que le phosphoroscope ne peut accuser.

En somme ce dernier mode d'expérimentation offre un des moyens les plus frappants que l'on puisse em-

ployer pour rendre appréciables les effets lumineux produits par les corps qui ont la faculté de conserver, pendant un temps plus ou moins long, l'action exercée par la lumière.

---

En résumé, dans cette séance où j'ai pu vous rendre témoin de plusieurs expériences fondamentales relatives aux effets lumineux qui résultent de l'action de la lumière sur les corps, j'ai voulu prouver que mes recherches sur ce sujet conduisent à des conclusions dont je me borne à rappeler les principales :

1° Lorsque la lumière vient frapper certains corps et peut-être la plupart d'entre eux, son action ne cesse pas aussitôt que la lumière cesse de les éclairer ; indépendamment des rayons réfléchis et transmis, ces corps émettent en vertu d'une action qui leur est propre des rayons lumineux dont la durée, l'intensité et la composition dépendent de leur nature et de leur état physique. Quelques-uns donnent une émission lumineuse de très-courte durée et inférieure à $\frac{1}{10.000}$ de seconde, d'autres donnent de la lumière pendant plus de 36 heures. Peut-être cette action est-elle générale et ne se manifeste-t-elle qu'à un degré beaucoup plus faible dans les corps que l'on ne peut voir dans le phosphoroscope, ce qui fait que l'on ne peut apprécier l'émission lumineuse que sur un certain nombre d'entre eux.

Les corps emmagasinent donc des vibrations, si l'on veut me permettre cette expression, et agissent ensuite comme sources lumineuses. Il est probable que ces actions interviennent dans certains effets de coloration que présentent plusieurs corps.

2° Il n'y a aucune relation entre la réfrangibilité de

la lumière active et celle de la lumière émise, mais les rayons émis ont toujours une longueur d'onde supérieure ou au plus égale à celle des rayons actifs. Ainsi des vibrations lumineuses d'une vitesse déterminée ne peuvent exciter dans les corps que des vibrations de même vitesse ou de vitesse moindre, mais non de vitesse plus grande.

3° Un même corps préparé de différentes manières peut présenter des effets lumineux variables d'intensité; mais quand la composition de la lumière émise est la même, la loi de l'émission reste la même et dépend, ainsi que la composition de cette lumière, de la nature seule du corps.

4° Pour quelques substances non-seulement la composition chimique, mais encore l'état physique influe tellement sur la composition de la lumière émise que l'on peut préparer à volonté, avec plusieurs d'entre elles, des masses phosphorescentes (phosphores artificiels) qui présentent une quelconque des nuances prismatiques.

Si l'on veut me permettre une comparaison pour représenter les effets obtenus, on pourrait dire que ces derniers corps, par rapport aux effets lumineux, sont analogues aux cordes sonores auxquelles on fait rendre différents sons suivant leur état de tension.

5° L'action temporaire de la chaleur tend à diminuer et même à anéantir l'intensité des effets lumineux émis par les corps en vertu de leur action propre après l'influence du rayonnement; elle modifie également la composition de la lumière émise, et ce changement peut être tel qu'avec une substance, le sulfure de strontium lumineux bleu à la température ordinaire, on peut obtenir toutes les nuances prismatiques comprises entre le violet et l'orangé, et cela entre les limites de température de — 20° à 150°.

6° L'emploi du phosphoroscope, en ce qui concerne les impressions exercées par la lumière sur certaines substances, permet d'aborder des questions analogues à celles qui règlent le refroidissement et les quantités de chaleur émises ou absorbées par les corps.

Ces conclusions, comme vous le voyez, montrent que les résultats de ces nouvelles recherches peuvent être invoqués dans l'étude de plusieurs questions de physique moléculaire, servent à éclairer différents points d'analyse chimique et touchent à l'une des parties les plus délicates de l'optique, c'est-à-dire à l'absorption de la lumière ainsi qu'à la nature même de l'agent lumineux.

---

# SUR LES
# CORPUSCULES ORGANISÉS
QUI EXISTENT
# DANS L'ATMOSPHÈRE.

## EXAMEN DE LA DOCTRINE DES GÉNÉRATIONS SPONTANÉES

---

LEÇON PROFESSÉE A LA SOCIÉTÉ CHIMIQUE DE PARIS

LE 19 MAI 1861

PAR M. L. PASTEUR

MEMBRE DE LA SOCIÉTÉ CHIMIQUE DE PARIS

Messieurs,

Existe-t-il des circonstances dans lesquelles on ait vu se produire des générations spontanées, dans lesquelles on ait vu la matière ayant appartenu à des êtres vivants conserver en quelque sorte un reste de vie et s'organiser d'elle-même? Voilà la question à résoudre. Il ne s'agit ici ni de religion, ni de philosophie, ni de systèmes quelconques. Peu importent les affirmations ou les vues à priori. C'est une question de fait. Et, vous le remarquerez, je n'ai pas la prétention d'établir que jamais il n'existe de générations spontanées. Dans les sujets de cet ordre on ne peut pas prouver la négative. Mais j'ai la prétention de démontrer avec rigueur que dans toutes les expériences où l'on a cru reconnaître l'existence de générations spontanées, chez les êtres les plus inférieurs, où le débat se trouve aujourd'hui relégué, l'observateur a été victime d'illusions ou de causes d'erreur qu'il n'a pas aperçues ou qu'il n'a pas su éviter.

Faisons d'abord l'histoire rapide de notre sujet.

Dans l'antiquité et jusqu'à la fin du moyen âge tout le monde croyait aux générations spontanées. Aristote dit que tout corps sec qui devient humide, et tout corps humide qui se sèche, engendrent des animaux. Van-Helmont décrit le moyen de faire naître des souris.

De pareilles erreurs ne pouvaient supporter longtemps l'esprit d'examen qui s'empara de l'Europe au seizième et au dix-septième siècle.

Redi, membre célèbre de l'Académie *del Cimento*, fit voir que les vers de la chair en putréfaction étaient des larves d'œufs de mouches. Ses preuves étaient aussi simples que décisives, car il montra qu'il suffisait d'entourer d'une gaze fine la matière en putréfaction pour empêcher d'une manière absolue la naissance de ces larves.

Mais bientôt dans la seconde partie du dix-septième siècle et la première moitié du dix-huitième, les observations se multiplièrent à l'envi, à l'aide du précieux et nouvel instrument que l'on venait de découvrir et auquel on avait donné le nom de microscope. La doctrine des générations spontanées reparut alors. Les uns, ne pouvant s'expliquer l'origine de ces êtres si variés que le microscope faisait apercevoir dans les infusions des matières végétales et animales, et ne voyant chez eux rien qui ressemblât à une génération sexuelle, furent portés à admettre que la matière qui avait eu vie conservait une vitalité propre, sous l'influence de laquelle ses parties disjointes se réunissaient de nouveau, dans certaines conditions favorables, et avec des variétés de structure et d'organisation que ces conditions mêmes déterminaient.

D'autres au contraire, ajoutant par l'imagination aux résultats merveilleux que l'observation leur faisait découvrir, croyaient voir des accouplements dans ces infusoires, des mâles, des femelles, des œufs, et se posaient en adversaires déclarés de la génération spontanée.

Il faut bien le reconnaître, les preuves à l'appui de l'une ou de l'autre opinion ne soutenaient guère l'examen.

La question en était là lorsque parut à Londres, en 1745, un ouvrage de Needham, observateur habile et prêtre catholique d'une foi vive, circonstance qui, dans un tel sujet, s'offrait comme un sûr garant de la sincérité de ses convictions.

Dans cet ouvrage, la doctrine des générations spontanées était appuyée par des expériences directes d'un genre tout nouveau.

L'ouvrage de Needham eut un grand retentissement.

Deux années ne s'étaient pas écoulées depuis sa publication que la Société royale de Londres admettait son auteur au nombre de ses membres. Plus tard il devint l'un des huit associés de l'Académie des sciences.

D'ailleurs Buffon prêta aux idées de Needham, sur la génération spontanée, l'appui de son beau langage. Son système des *molécules organiques* n'est qu'une variante des idées de Needham sur la *force végétative*. Il est présumable que les résultats de Needham eurent une grande influence sur les vues de Buffon, car c'est à l'époque même où cet illustre naturaliste rédigeait son ouvrage, que Needham fit un voyage à Paris, durant lequel il fut le commensal de Buffon.

Mais les conclusions de Needham ne tardèrent pas à être soumises à une vérification expérimentale. Il y avait alors en Italie l'un des plus habiles physiologistes dont la science puisse s'honorer, le plus ingénieux, le plus difficile à satisfaire, l'abbé Spallanzani.

L'expérience seule pouvait condamner ou absoudre les opinions de Needham. C'est ce que Spallanzani comprit très-bien. « Dans plusieurs villes d'Italie, dit-il, on a vu des partis formés contre l'opinion de M. de Needham; mais je ne crois pas que personne ait jamais songé à l'examiner par la voie de l'expérience. »

Il serait sans utilité de présenter un historique complet de la querelle des deux savants naturalistes. Mais il importe de bien préciser la difficulté expérimentale à laquelle ils appliquèrent plus particulièrement leurs efforts, et de rechercher si ce long débat avait éloigné tous les doutes. C'est ce que l'on croit généralement. Spallanzani est volontiers regardé comme l'adversaire victorieux de Needham. Un examen impartial de leurs observations contradictoires sur le point le plus délicat du sujet va nous montrer que Needham ne pouvait, en toute justice, abandonner sa doctrine en présence des travaux de Spallanzani.

J'ai dit que Needham avait appuyé la doctrine des générations spontanées sur des expériences directes. C'est lui en effet qui est l'auteur de la méthode des expériences en vases clos exposés préalablement à l'action du feu.

« M. de Needham, dit Spallanzani, nous assure que les expériences ainsi disposées ont toujours réussi fort heureusement entre ses mains, c'est-à-dire que les infusions ont montré des infusoires et que c'est là ce qui a mis le sceau à son système.

« Si après avoir purgé, ajoute Spallanzani, par le moyen du feu, et les substances que l'on met dans les vases et l'air contenu dans ces mêmes vases, on porte encore la précaution jusqu'à leur ôter toute communication avec l'air ambiant, et que malgré cela, à l'ouverture des fioles, on y trouve encore des animaux vivants, cela deviendra une forte preuve contre le système des ovaires; *j'ignore même ce que ses partisans pourront y répondre.* »

Notez bien ces derniers mots. Ils prouvent que Spallanzani plaçait dans le résultat des expériences ainsi conduites le criterium de la vérité ou de l'erreur. Or, nous allons voir que tel était également l'avis de

Needham, par la citation suivante, extraite des notes de Needham :

« Il ne me reste plus, dit Needham, qu'à parler de la dernière expérience de Spallanzani, qu'il regarde lui-même comme la seule de toute sa dissertation qui paraît avoir quelque force contre mes principes.

« Il a scellé hermétiquement dix-neuf vases remplis de différentes substances végétales, et il les a fait bouillir, ainsi fermés, pendant l'espace d'une heure. Mais de la façon qu'il a traité et mis à la torture ses dix-neuf infusions végétales, il est visible que non-seulement il a beaucoup affaibli, ou peut-être totalement anéanti la *force végétative* des substances infusées, mais aussi qu'il a entièrement corrompu, par les exhalaisons et par l'ardeur du feu, la petite portion d'air qui restait dans la partie vide de ses fioles.

« Voici donc ma dernière proposition et le résultat de tout mon travail en peu de mots : qu'il se serve, en renouvelant ses expériences, de substances suffisamment cuites pour détruire tous les prétendus germes qu'on croit attachés ou aux substances mêmes ou aux parois intérieures, ou flottants dans l'air du vase; qu'il plonge ensuite ses vases, scellés hermétiquement, dans l'eau bouillante pendant quelques minutes, le temps seulement qu'il faut pour durcir un œuf de poule et pour faire périr les germes, et je réponds qu'il trouvera toujours de ces êtres vitaux microscopiques en nombre suffisant pour prouver mes principes. S'il ne trouve, à l'ouverture de ses vases, après les avoir laissés reposer le temps nécessaire à la génération de ces corps, rien de vital ni aucun signe de vie, en se conformant à ces conditions, j'abandonne mon système et je renonce à mes idées. C'est, je crois, tout ce qu'un adversaire judicieux peut exiger de moi. »

Voilà certes le débat bien nettement limité entre les deux observateurs. C'est dans le chap. III du tome premier de ses *Opuscules* que Spallanzani aborde cette difficulté décisive. Et quelle est sa conclusion ? Pour supprimer toute production d'infusoires il est nécessaire de maintenir trois quarts d'heure les infusions à la température de l'eau bouillante.

Or, cette durée obligée d'une température de 100° pendant trois quarts d'heure ne justifiait-elle pas les craintes de Needham sur une altération possible de l'air des vases ? Il aurait fallu tout au moins que Spallanzani joignît à ses expériences une analyse de cet air, mais la science n'était pas encore assez avancée. L'eudiométrie n'était pas créée. La composition de l'air était à peine connue.

Mais bien plus, nous allons voir les objections de Needham légitimées, au moins en apparence, par les progrès ultérieurs de la science.

Appert appliqua à l'économie domestique les résultats des expériences de Spallanzani effectuées selon la méthode de Needham. Par exemple, l'une des expériences du savant italien consiste à introduire des petits pois avec de l'eau dans un vase de verre que l'on ferme ensuite hermétiquement, après quoi on le maintient dans l'eau bouillante pendant trois quarts d'heure. C'est bien le procédé d'Appert. Or, Gay-Lussac, voulant se rendre compte de ce procédé, le soumit à divers essais et arriva au résultat suivant :

« On peut se convaincre, dit Gay-Lussac, en analysant l'air des bouteilles dans lesquelles les substances (bœuf, mouton, poisson, champignons, moût de raisin) ont été bien conservées, qu'il ne contient plus d'oxygène, et que l'absence de ce gaz est par conséquent une condition nécessaire pour la conservation des substances animales et végétales. »

Ne prenons que la première partie de cette assertion de Gay-Lussac, à savoir, qu'il n'y a plus d'oxygène dans les conserves d'Appert. Ne voyez-vous pas qu'elle justifie les craintes de Needham sur une altération de l'air des vases dans les expériences de Spallanzani? Comme je le disais tout à l'heure, par conséquent, Spallanzani n'avait pas triomphé des objections de Needham.

Mais vous allez reconnaître que ceci n'est que la surface des choses.

Au mois de février 1837, le docteur Schwann, de Berlin, ajouta un progrès notable dans la question qui nous occupe. Il publia le fait suivant : Une infusion de chair est mise dans un ballon de verre. On ferme ensuite le ballon à la lampe, puis on l'expose tout entier à la température de l'eau bouillante, et après son refroidissement on l'abandonne à lui-même. Le liquide ne se putréfie pas. Jusque-là rien de bien nouveau. C'est une conserve d'Appert. Le docteur Schwann ne parle pas des expériences d'Appert, de Gay-Lussac, de Spallanzani. — Je répare cet oubli, parce que l'une de mes préoccupations dans cette leçon sera de chercher à rendre à chaque expérimentateur la part de progrès qui lui est due. Mais il était désirable, ajoute M. Schwann, de modifier l'essai de telle manière qu'un renouvellement de l'air devînt possible, avec cette condition toutefois, que le nouvel air fût préalablement chauffé comme l'est celui du ballon à l'origine. Alors M. Schwann répète l'expérience précédente, en faisant arriver dans le ballon, aussitôt après l'ébullition, de l'air froid, mais qui passait préalablement dans des tubes de verre entourés de bains d'alliage fusible. Le résultat fut le même, il n'y eut pas d'altération du liquide organique.

C'était là un grand progrès. En effet, cela montrait

l'erreur de l'interprétation de Gay-Lussac, relative à l'influence du gaz oxygène dans l'altération des conserves. Non, l'absence de l'oxygène n'est pas, comme le pensait Gay-Lussac, une condition nécessaire de l'inaltérabilité des conserves d'Appert.

Voilà le progrès du docteur Schwann. Il a montré que les conserves d'Appert continuaient de se conserver en présence de l'air, pourvu que l'air eût été chauffé. Et il a donné raison à Spallanzani contre Needham.

Quelle fut, messieurs, la conclusion que le docteur Schwann déduisit de son expérience? Que ce n'est pas l'oxygène seul qui occasionne la putréfaction, mais un principe renfermé dans l'air ordinaire, que la chaleur peut détruire. — La réserve de cette conclusion mérite d'être remarquée. Il ne dit pas que par la chaleur il détruit des germes. C'eût été aller au delà des faits. C'eût été ajouter une hypothèse à son travail, bien que l'on voie qu'il penche à croire que ses résultats sont favorables à la vieille hypothèse de la dissémination des germes.

Les expériences du docteur Schwann ont été répétées et modifiées par divers observateurs. MM. Ure et Helmholtz ont confirmé ses résultats par des expériences analogues aux siennes. M. Schultze, au lieu de calciner l'air avant de le mettre au contact des conserves d'Appert, le fit passer à travers des réactifs chimiques énergiques, potasse et acide sulfurique concentrés. MM. Schrœder et Dusch imaginèrent de filtrer l'air à travers du coton, au lieu de le modifier par une température élevée ou par les réactifs chimiques. Le premier mémoire de M. Schrœder a paru en 1854, le second en 1859. Ce sont d'excellents travaux, qui ont en outre le mérite historique de montrer l'état de la question qui nous occupe à la date de 1859. Je vais en présenter le résumé rapide.

On savait depuis longtemps, et dès les premières discussions sur la génération spontanée, qu'une gaze fine, déjà employée avec tant de succès par Redi, suffisait pour empêcher ou tout au moins pour modifier singulièrement l'altération des infusions. Ce fait même était au nombre de ceux qu'invoquaient alors de préférence les adversaires de la doctrine des générations spontanées.

Voici, par exemple, un passage d'un ouvrage bien connu sur le microscope, par Baker, membre de la Société royale de Londres, dont la traduction française parut en 1754.

« J'ai trouvé constamment, dit Baker, que si l'infusion (de poivre, de foin) est couverte d'une mousseline ou d'une autre toile fine, il ne s'y produit que très-peu d'animaux, mais que si l'on ôte cette couverture, elle est dans peu de jours pleine de vie.... Comme les œufs de ces petites créatures sont moins pesants que l'air, il peut se faire qu'il en flotte continuellement des millions dans l'air, et qu'étant portés indifféremment de tous les côtés, il en périsse un grand nombre dans les endroits qui ne conviennent pas à leur nature.... Il y a des gens qui s'imaginent que les œufs de ces petits animaux sont logés dans le poivre, dans le foin, ou dans toutes les autres matières que l'on met dans l'eau; mais, si cela était, je ne saurais comprendre comment une petite couverture d'une toile fine, qui n'empêche pas l'air de pénétrer, pourrait empêcher ces œufs d'éclore. »

Guidés sans doute par ces faits, et surtout, comme ils le disent expressément, par les expériences ingénieuses de M. Lœwel, qui reconnut que l'air ordinaire était impropre à provoquer la cristallisation du sulfate de soude, lorsqu'il avait été filtré sur du coton,

MM. Schrœder et Dusch ont procédé de la manière suivante :

Un ballon de verre reçoit la matière organique. Le bouchon du ballon est traversé par deux tubes recourbés à angle droit. L'un de ces tubes communique avec un aspirateur à eau ; l'autre à un large tube d'un pouce de diamètre et de vingt pouces de longueur, rempli de coton. On chauffait alors la matière organique en maintenant l'ébullition un temps suffisant pour que tous les tubes de communication fussent échauffés fortement par la vapeur d'eau. Alors on ouvrait le robinet de l'aspirateur.

Dans leur premier travail, MM. Schrœder et Dusch ont opéré : 1° Sur de la viande avec addition d'eau ;
2° Sur le moût de bière ;
3° Sur le lait ;
4° Sur la viande sans addition d'eau.

Dans les deux premiers cas, l'air filtré à travers le coton a laissé intactes les liqueurs. Mais le lait s'est caillé et la viande sans eau est entrée en putréfaction.

« Il semble donc résulter de ces expériences, disent MM. Schrœder et Dusch, qu'il y a des décompositions spontanées de substances organiques qui n'ont besoin pour commencer que de la présence du gaz oxygène. Par exemple, la putréfaction de la viande sans eau, la putréfaction de la caséine du lait, et la transformation du sucre de lait en acide lactique. Mais à côté il y aurait d'autres phénomènes de putréfaction et de fermentation placés à tort dans la même catégorie que les précédents, tels que la putréfaction du jus de viande et la fermentation alcoolique, qui exigeraient pour commencer, outre l'oxygène, ces choses inconnues mêlées à l'air atmosphérique, qui sont détruites par la chaleur d'après les expériences de Schwann, et d'a-

près les nôtres par la filtration de cet air à travers le coton. Comme il reste ici encore tant de questions à décider par la voie de l'expérience, nous nous abstiendrons de déduire aucune conclusion théorique de nos expériences. »

M. Schrœder revint seul sur le sujet en 1859, dans un mémoire qui traite en outre de la cause de la cristallisation. Ce nouveau travail ne conduisit pas davantage son auteur à des conclusions dégagées de toute incertitude. Il y fait connaître de nouveaux liquides organiques qui ne se putréfient pas lorsqu'on les met au contact de l'air filtré, et il ajoute le jaune d'œuf à la liste de ceux qui, comme le lait et la viande sans eau, se putréfient dans l'air filtré sur le coton.

« On pourrait admettre, dit-il, que l'air frais renferme une substance active qui provoque les phénomènes de fermentation alcoolique et de putréfaction, substance que la chaleur détruirait ou que le coton arrêterait. Mais faut-il regarder cette substance active comme formée de germes organisés microscopiques disséminés dans l'air, ou bien est-ce une substance chimique encore inconnue? je l'ignore. »

Puis il arrive aux phénomènes de cristallisation par l'air libre, ou par l'air filtré à la manière de Lœwel, et il finit par identifier complétement la cause de la cristallisation et de la putréfaction.

Remarquez-le bien, messieurs, ce travail est de 1859. Vous comprendrez maintenant les difficultés qui, à cette date, devaient assiéger tout esprit impartial, libre d'idées préconçues, et désireux de se former une opinion dûment motivée sur cette grave question des générations spontanées? Tous ceux qui la croyaient résolue en connaissaient mal l'histoire.

Spallanzani n'avait pas triomphé des objections de

Needham, et MM. Schwann, Schultze et Schrœder n'avaient fait que démontrer l'existence dans l'air d'un principe inconnu, comme ils le disent expressément, qui était la condition de la vie dans les infusions.

Et puis, les expériences de Schwann, de Schultze, de Schrœder échouaient quand on les répétait sur certains liquides. Bien plus, elles échouaient constamment et pour tous les liquides lorsqu'on employait la cuve à mercure.

Aussi lorsque, postérieurement aux travaux dont je viens de parler, à la fin de l'année 1859, un habile naturaliste de Rouen, M. Pouchet, membre correspondant de l'Académie, vint annoncer des résultats sur lesquels il croyait asseoir d'une manière définitive la doctrine des générations spontanées, personne ne sut indiquer la véritable cause d'erreur de ses expériences. Et bientôt l'Académie des sciences, malgré les protestations qui avaient accueilli dans son sein les communications de M. Pouchet, comprenant tout ce qui restait encore à faire, proposa pour sujet de prix la question suivante :

« Essayer, par des expériences bien faites, précises, rigoureuses, également étudiées dans toutes leurs circonstances, de jeter un jour nouveau sur la question des générations spontanées. »

La question paraissait alors si obscure, que M. Biot, dont la bienveillance n'a jamais fait défaut à mes études, me voyait avec peine engagé dans ces recherches, et réclamait de ma déférence à ses conseils l'acceptation d'une limite de temps au delà de laquelle j'abandonnerais ce sujet, si je n'avais pas vaincu les difficultés qui m'arrêtaient. Notre illustre président, M. Dumas, dont la bienveillance a souvent conspiré en ce qui me touche avec celle de M. Biot, se rappellera peut-être qu'à la même époque il me disait : « Je ne conseille-

rais à personne de rester trop longtemps dans ce sujet. »

Mais quel besoin avais-je donc de m'attacher à cette étude? Un besoin impérieux que vous allez comprendre.

Les chimistes ont découvert depuis vingt ans une foule de phénomènes vraiment extraordinaires, désignés sous le nom générique et déjà bien ancien de fermentations. Tous ces phénomènes exigent le concours de deux matières, l'une dite fermentescible, telle que le sucre, l'autre azotée, appelée ferment, qui est toujours une matière albuminoïde. Or voici la théorie qui était universellement admise : Les matières albuminoïdes exposées au contact de l'air éprouvent une altération, une oxydation particulière de nature inconnue, qui leur donne le caractère de ferment, c'est-à-dire la propriété d'agir ensuite par leur contact sur les substances fermentescibles.

Il y avait bien une fermentation, la plus ancienne et la plus remarquable de toutes, la fermentation alcoolique, où le ferment était un végétal microscopique. Mais comme dans toutes les fermentations de découverte plus moderne on n'avait pu reconnaître des êtres organisés, on avait abandonné peu à peu, bien à regret sans doute, l'hypothèse d'une relation probable entre l'organisation de ce ferment et sa propriété d'être ferment, et l'on appliquait à la levûre de bière la théorie générale, et l'on disait : ce n'est pas parce qu'elle est organisée qu'elle agit, c'est parce qu'elle a été au contact de l'air, et c'est la portion de la levûre qui est morte, qui est en voie de putréfaction, qui agit sur le sucre.

Dans des études persévérantes et qui sont bien loin de leur terme, j'arrivai à des conclusions entièrement différentes et je reconnus que toutes les fermentations

proprement dites, visqueuse, lactique, butyrique, la fermentation de l'acide tartrique, de l'acide malique.... étaient toujours coexistantes de la présence d'êtres organisés, et que loin que l'organisation de la levûre de bière fût une chose gênante pour la théorie, c'était par là au contraire qu'elle rentrait dans la loi commune et qu'elle était le type de tous les ferments proprement dits. En d'autres termes, je trouvais que les matières albuminoïdes, dans les fermentations proprement dites, n'étaient jamais des ferments, mais l'aliment des ferments, et que les vrais ferments étaient des êtres organisés. Or ils prennent naissance, on le savait, par le fait du contact des matières albuminoïdes et de l'oxygène. Dès lors, de deux choses l'une : ces ferments organisés étaient des générations spontanées, si l'oxygène seul, en tant qu'oxygène, leur donnait naissance par son contact avec les matières organisées; ou bien ces ferments organisés n'étaient pas des générations spontanées, et alors ce n'était pas en tant qu'oxygène seul que ce gaz agissait, mais comme excitant d'un germe apporté en même temps que lui ou existant dans les matières. Voilà comment il était indispensable, au point où je me trouvais de mes études sur les fermentations, que je résolusse, s'il était possible, la question des générations spontanées. Les recherches dont j'ai maintenant à vous rendre compte n'ont donc été qu'une digression, mais une digression obligée de mes travaux sur les fermentations. Et c'est ainsi que j'ai été conduit à m'occuper d'un sujet qui jusque-là n'avait exercé que la sagacité des naturalistes.

Si je ne me trompe, messieurs, l'analyse des travaux que je viens de vous présenter et qui nous conduit jusqu'à l'année 1859, posait le débat en termes très-nets. La plupart des naturalistes, forts de l'analogie et de la restriction chaque jour plus grande apportée au

nombre des faits de génération prétendue spontanée, admettaient l'ancienne hypothèse de la dissémination aérienne des germes, et affirmaient que c'étaient ces germes que l'on arrêtait ou que l'on détruisait dans les expériences de Schwann, de Schultze et de Schrœder. Les partisans de la génération spontanée, au contraire, affirmaient que dans ces expériences on détruisait un principe inconnu, peut-être un gaz analogue à l'ozone, peut-être un fluide.... enfin quelque chose sans vie qui était le *primum movens* de la vie dans les infusions, ainsi que M. Schrœder et M. Schwann lui-même le laissaient supposer. Si ce sont des germes, ajoutaient-ils, montrez-les. Ce sont choses visibles et reconnaissables au microscope. On ne peut pas nier, disaient-ils encore, que dans la poussière déposée à la surface des objets ou des monuments les plus anciens, il n'y ait quelquefois des spores ou des œufs de microzoaires, mais il y en a en nombre excessivement restreint, comme il y a partout des semences voyageuses.

L'un des partisans les plus déclarés de la doctrine des générations spontanées, M. Pouchet, s'exprime ainsi :

« On rencontre parfois dans la poussière quelques œufs de microzoaires, mais c'est une véritable exception. »

Plus loin il dit :

« Parmi les corpuscules de poussière qui appartiennent au règne végétal, il y a des spores de cryptogames, mais en fort petit nombre. Et il ajoute : mais j'ai constamment rencontré une certaine quantité de fécule de blé. Il est évident que c'est cette fécule ou que ce sont des grains de silice que l'on a pris pour des œufs de microzoaires. »

Voilà exactement le point où j'ai pris la question.

Remarquons d'abord qu'il ne sert pas à grand'chose d'étudier la poussière au repos. Quel volume d'air l'a

fournie? Il est impossible de le dire. Et puis, des corpuscules en suspension dans l'air quels sont ceux qui se déposent? Les plus lourds, c'est-à-dire les corpuscules minéraux ou les corpuscules organiques du plus grand volume, et ce sont au contraire les plus légers que nous aurions intérêt à recueillir et à étudier.

Or voici un moyen simple de rassembler les corpuscules qui sont en suspension dans l'air, et de les examiner au microscope. Plaçons dans un tube de verre une petite bourre de coton-poudre, de la variété de ce coton qui est soluble dans l'éther acétique ou dans un mélange d'alcool et d'éther. Puis, à l'aide d'un aspirateur à eau, faisons passer dans le tube un volume d'air déterminé. Les particules de poussière seront arrêtées, au moins en très-grande partie, par les fibres du coton. Alors dissolvons le coton dans le mélange éthéré. Par un repos de vingt-quatre heures toutes les poussières tomberont au fond du tube, où il sera facile de les laver plusieurs fois par décantation. On les transporte alors dans un verre de montre, où le restant du liquide s'évapore; puis on les soumet sur le porte-objets du microscope à divers réactifs propres à déceler leur nature. Le mieux est de les délayer dans l'acide sulfurique concentré, qui dissout sur le champ la fécule, et qui n'altère pas la forme de beaucoup de germes des moisissures ou des infusoires, et c'est la forme surtout qui sert à les reconnaître. L'acide sulfurique a en outre l'avantage de disjoindre les corpuscules de nature diverse, de les isoler et de permettre ainsi de mieux reconnaître ceux qui sont organisés; car ces derniers se trouvent souvent englobés par des poussières amorphes qui empêchent de bien distinguer leurs contours.

Cela posé, voici le résultat auquel on arrive. Aux poussières amorphes se trouvent constamment associés

des corpuscules évidemment organisés, de volume, de forme et de structure très-variables. J'ai l'honneur de faire passer sous vos yeux quelques dessins qui les représentent. Imaginez de petits globules d'une sphéricité parfaite ou légèrement ovoïdes, translucides ou remplis de granulations, quelquefois avec de petites sphères intérieures qui rappellent tout à fait des nucléus ou des nucléoles de cellules..., et vous aurez une idée de ces corpuscules. Peut-on dire : celui-ci est une spore, celui-là est un œuf? et bien plus, car M. Pouchet voudrait que j'allasse jusque-là, la spore de telle moisissure et l'œuf de tel infusoire? vraiment je ne le crois pas. On peut affirmer la ressemblance parfaite avec des germes d'organismes inférieurs, mais voilà tout.

Et quel en est le nombre? Il est très-variable, suivant les conditions atmosphériques. Ainsi je ne doute pas, d'après ce que j'ai constaté dans ce genre d'études, qu'il serait si utile de poursuivre, d'étendre et de perfectionner, que la transparence de l'air après la pluie est due en grande partie à l'entraînement des poussières à la surface du sol par les gouttes de pluie. Je ne doute pas davantage que le brouillard ne doive une partie de son opacité aux nombreux corpuscules amorphes et organisés qu'il renferme.

Quoi qu'il en soit, voici un résultat qui vous donnera une idée du nombre vraiment notable des corpuscules organisés qui existent en suspension dans l'air d'une rue de Paris peu fréquentée, la rue d'Ulm. Faites passer pendant vingt-quatre heures, après une succession de beaux jours, un courant d'air assez rapide sur une petite bourre de coton d'un centimètre de long sur un demi-centimètre de large (qui n'arrête pas toutes les poussières, car on en retrouve sur une deuxième, sur une troisième.... si on en place plusieurs à la suite dans le même tube), et il sera facile

de comoter dans la poussière recueillie et délayée dans l'acide sulfurique concentré plusieurs milliers de corpuscules organisés. Le calcul est bien simple en connaissant le rapport des surfaces réelles du champ et de la goutte de liquide étalée, et le nombre moyen de corpuscules que l'on aperçoit dans chaque champ que l'on considère.

M. Pouchet, pour réfuter ces expériences, a opéré sur de la neige fondue. J'ignore si ce moyen vaut le mien. Mais dans tous les cas il aurait fallu faire fondre la première neige tombée, et non la dernière. M. Pouchet dit qu'il s'est servi de la dernière.

Voilà qui est bien acquis : l'air charrie constamment, et par suite laisse déposer sans cesse à la surface des objets, des corpuscules organisés dont la forme et la structure ne permettent pas de les distinguer des germes des organismes les plus inférieurs. Ces corpuscules sont-ils des germes féconds? C'est ce qu'il faut essayer de rechercher par l'expérience. L'expérience est naturellement indiquée : il faut les semer dans une liqueur putrescible propre à la nourriture des infusoires et des cryptogames, et voir ce qui en résultera, avec cette précaution, d'ailleurs indispensable, d'éloigner complétement l'accès de l'air ordinaire, que nous savons être actif sans en connaître la cause, et d'une manière non moins absolue toute manipulation sur la cuve à mercure. Son emploi, je le dirai tout à l'heure, troublerait tous les résultats.

Dans un ballon de 250 centimètres cubes j'introduis 100 centimètres cubes d'eau de levûre sucrée ou non sucrée; j'adapte l'extrémité étirée du col à un tube de platine entouré d'un manchon que l'on chauffe au gaz à une température rouge. Je fais bouillir le liquide, de manière à chasser l'air ordinaire par la vapeur d'eau. Après le refroidissement, le ballon se trouve rempli d'air

à la pression ordinaire, et qui a été porté au rouge; on ferme le col à la lampe. Le ballon peut être alors abandonné à lui-même indéfiniment sans éprouver aucune altération.

C'est dans ce ballon que nous allons suivre les effets de l'introduction des poussières de l'air, mais il nous faut une méthode irréprochable, qui éloigne toute cause d'erreur. Supposez pour un instant que nous puissions remplir cette salle d'air calciné. L'opération serait bien simple : nous savons que cet air est inactif sur ce liquide. Nous briserions le ballon et nous introduirions nos poussières. Si un effet quelconque se produisait, il serait dû aux poussières déposées. On ne pourrait l'attribuer à rien autre chose. Eh bien, c'est précisément la condition que nous allons réaliser à l'aide de cet appareil.

Un tube de platine avec son manchon de terre cuite et son appareil à gaz, un tube en T muni de robinets. L'une des branches communique au tube de platine, la deuxième à la machine pneumatique, et la troisième à un gros tube de verre.

Dans ce gros tube plaçons un fragment de l'une de nos bourres de coton chargées de poussières de l'air, à l'aide d'un tube de verre de petit diamètre. Enfin adaptons le ballon à l'aide d'un caoutchouc, ballon que je supposerai être à l'étuve depuis deux mois par exemple. Cela posé, faisons le vide dans l'appareil, après avoir fermé le robinet qui communique au tube de platine; laissons rentrer l'air calciné; et répétons cette manœuvre dix à douze fois. Le petit tube à coton sera entouré d'air calciné, c'est-à-dire inactif, puisque le ballon en est rempli depuis deux mois sans que son liquide ait éprouvé d'altération.

Alors je brise la pointe du ballon à travers le caoutchouc et je laisse glisser le petit tube dans le ballon,

que je referme à la lampe et que je reporte à l'étuve, dans la même situation qu'auparavant. Qu'y a-t-il dans ce ballon de plus que tout à l'heure? Les poussières qui existent dans l'air: rien de plus.

Voyons maintenant les résultats. Après vingt-quatre, trente-six ou quarante-huit heures au plus, on voit toujours des productions organisées apparaître. En plaçant le ballon entre l'œil et la lumière, on les distingue dès leur premier commencement, à cause de la limpidité parfaite du liquide. Cette limpidité n'est troublée que s'il y a formation d'infusoires, et c'est là un excellent indice pour savoir que les infusoires ont pris naissance. Comme ils voyagent partout dans la masse du liquide, ils en troublent promptement la transparence. Les moisissures s'annoncent par des touffes de mycelium plus ou moins serrées, plus ou moins soyeuses, suivant les espèces qui sont nées. Les torulacées s'annoncent de leur côté par des traînées blanches, sous forme de précipités sur les parois du ballon.

Comme on voit bien, en suivant pas à pas ce genre d'expériences, tout ce qu'il y a de faux dans cette assertion des partisans des générations spontanées, à savoir que l'apparition des premiers organismes est toujours précédée par des phénomènes de fermentation ou de putréfaction, et que la formation des animalcules dans les macérations est précédée d'un dégagement de gaz divers dus à la décomposition des substances qu'on a employées, après quoi il se forme à la surface des liquides une pellicule particulière!

Aussi, lorsqu'on me parle de mouvement fermentescible que je détermine dans mes liqueurs en y déposant les poussières, *mouvement fermentescible nécessaire pour l'évolution des forces génésiques*, je ne vois là que des mots vagues auxquels l'expérience m'apprend à ne prêter aucun sens raisonnable.

Mais il y a une contre-épreuve nécessaire. Il faut répéter la même expérience à blanc, afin de voir si la manipulation n'a pas par elle-même une influence sur le résultat. A cet effet, chargeons des poussières qui sont en suspension dans l'air, non plus du coton, mais de l'amiante. L'expérience d'ensemencement réussit tout aussi bien qu'avec le coton. Mais faisons l'essai en passant l'amiante dans la flamme avant de l'introduire dans le petit tube, de manière à détruire tous les germes. On ne verra aucune production d'aucune sorte apparaître dans le ballon à la suite de l'introduction dans le ballon de cette amiante calcinée.

Il est très-curieux d'étudier dans ces expériences l'influence que le développement d'une production peut avoir sur une production voisine. Il n'est pas rare, par exemple, de voir un mycelium dont l'accroissement de volume était chaque jour plus sensible s'arrêter tout à coup parce que le liquide est devenu trouble et que des infusoires ont pris naissance. Cela tient uniquement à ce que les infusoires s'emparent de l'air en dissolution, air nécessaire à la vie de la plante. Pareil effet peut avoir lieu sous l'influence du développement d'un mycelium nouveau plus vivace que le premier. Et, la preuve que c'est simplement l'air qui manque à la plante, c'est que si vous renversez le ballon de manière à amener la plante dans le goulot, et que vous la laissiez là, le goulot incliné, librement exposée à l'air du ballon, vous la voyez en quelques heures reprendre sa marche et, le lendemain, offrir un développement des plus marqués qui, bientôt même enlevant tout l'air, s'oppose au développement des autres productions qui sont dans le liquide du ballon. Si ce sont des infusoires, le liquide s'éclaircit. Ils meurent tous et viennent se déposer au fond du ballon, comme ferait un précipité. Dès qu'il n'y a plus d'oxygène, la vie est

suspendue. Les choses restent telles quelles indéfiniment.

La rapidité de l'absorption du gaz oxygène, qui se trouve toujours remplacé par de l'acide carbonique en proportions variables, est souvent considérable. Il suffit quelquefois de deux ou trois jours pour que tout l'oxygène disparaisse.

N'abandonnons pas ce genre d'expérience sans lui faire donner un résultat nouveau bien digne d'intérêt dans le sujet qui nous occupe. On voit que l'appareil est disposé de telle façon qu'il est bien facile de soumettre les poussières à l'action d'une température plus ou moins élevée à l'état sec, avant de les semer dans la liqueur organique. Il suffira de faire plonger le tube en U dans un bain d'eau pure, d'eau saturée de divers sels ou d'huile. Un thermomètre donnera la température exacte du bain.

Cela posé, il sera facile, d'autre part, de comparer l'action de la température sur la fécondité des poussières avec l'action de la température sur la fécondité des véritables spores des moisissures les plus vulgaires.

Eh bien, on arrive à ce résultat, c'est que les poussières qui sont en suspension dans l'air conservent leur fécondité jusqu'à la température de 120° environ. Si l'on élève la température à 130°, les poussières ne donnent plus de productions. Or, les spores des moisissures vulgaires sont dans le même cas. Chauffées à l'abri de toute humidité, elles restent fécondes jusqu'à 120°; mais si la température atteint 130°, elles ne germent plus.

Cette correspondance n'est-elle pas une preuve nouvelle que parmi les corpuscules organisés qui existent dans l'air il y a des spores de cryptogames?

Les expériences que je viens de rapporter me

paraissent mettre hors de doute que l'origine des productions organisées des infusions qui ont été portées à l'ébullition est due exclusivement aux poussières qui existent en suspension dans l'atmosphère.

Voici une autre méthode d'expérimentation qui achèvera de le démontrer.

Je place dans un ballon une liqueur putrescible, et j'étire ensuite le col en le recourbant et le contournant de diverses manières, puis je fais bouillir le liquide pendant deux à trois minutes. Le liquide reste intact. Je croyais d'abord qu'il fallait placer le ballon dans un lieu tranquille, où l'air ne serait pas agité du tout. C'est inutile. Tout se passe à l'entrée. L'air intérieur fait coussin. Les mouvements ne s'y propagent pas, ou avec tant de lenteur que les poussières entraînées ont le temps de tomber et de s'arrêter en route.

Vient-on, au contraire, à donner un trait de lime au col et à le détacher, au bout de un à deux jours les productions commencent à se montrer.

Vient-on même à donner au liquide des secousses violentes, de manière à déterminer des mouvements brusques de l'air, on peut être sûr de provoquer la naissance des moisissures ou des infusoires.

L'ensemble de ces résultats montre, ce me semble, avec la dernière évidence, que toutes les productions des infusions qui ont été chauffées sont dues exclusivement aux poussières qui sont en suspension dans l'air ; que toute idée de principes mystérieux, fluides, gaz connus ou inconnus, ozone.... doit être écartée. Il n'y a quoi que ce soit dans l'air, hormis les particules solides qu'il charrie, qui soit une condition de la vie dans les infusions.

Ce résultat est certain. Tout le progrès de mon travail est là. Ne l'exagérons pas, ne le restreignons pas. Soit une infusion organique qui a subi l'ébullition.

Exposée à l'air, elle s'altère, elle montre en très-peu de jours des cryptogames et des infusoires. Eh bien, il est prouvé par mes expériences que son altération est uniquement due à la chute des particules solides que l'air charrie toujours. Rien, rien autre n'est la cause de la vie dans les infusions *qui ont été portées à l'ébullition.* En outre, je recueille ces particules et je vous les montre au microscope formées de débris amorphes associés à des corpuscules organisés qui ressemblent complétement à des œufs infusoires ou à des spores de cryptogames.

Voulez-vous, vous, partisan de la génération spontanée, soutenir encore vos principes en présence de ces faits? vous le pouvez. Mais il faudra que vous disiez que vous préférez placer l'origine des productions organisées dans les débris amorphes, la suie, le carbonate de chaux, la silice, les brins de laine.... plutôt que dans les corpuscules, qui ressemblent tant aux germes de ces mêmes productions. L'inconséquence d'un pareil raisonnement ressort d'elle-même. C'est le progrès de mes expériences d'y avoir acculé les partisans de là doctrine de la génération spontanée, qui jusque-là pouvaient invoquer l'existence possible dans l'atmosphère de je ne sais quel principe mystérieux, gaz ou fluide, capable de provoquer la naissance des générations dites spontanées.

M. Pouchet présente *comme une immense objection*, ce sont ses expressions, que dans mes ballons je ne vois pas naître de gros infusoires ciliés, des kolpodes, des vorticelles.... Mais je vois naître dans mes ballons ce que j'y vois naître quand je les expose librement au contact de l'air pendant quelques jours.

Si M. Pouchet venait me dire : Voici une infusion qui a subi l'ébullition et qui, dans l'espace de deux ou trois jours, va fournir, à l'air libre, des gros infu-

soires ciliés, et que je ne pusse pas les faire naître dans mes ballons, sous l'influence de l'ensemencement des poussières en suspension dans l'air, ce serait là une grave objection. Mais je ne connais rien de pareil et je vois toujours le liquide de mes ballons s'altérer comme il s'altère à l'air. Ce sont tout à fait des productions de même ordre.

Ce qui trompe ici M. Pouchet, c'est la différence bien réelle qui existe entre les infusions qui ont été portées à l'ébullition et celles qui n'ont pas été chauffées, sous le rapport du nombre et de la variété des infusoires. Il est certain, par exemple, que si l'on fait une infusion de foin à froid, elle offrira quelques jours après des infusoires bien plus variés, de bien plus grande dimension, que la même infusion préparée à la température de l'ébullition. Je ne saurais dire exactement la cause de cette différence. Doit-elle être attribuée à des germes que le foin brut, que le poivre brut.... renfermeraient, et que l'ébullition ferait périr, ou bien à la nature et à la qualité des substances des organes des êtres vivants, lesquelles jouissent de propriétés spéciales que la chaleur modifie profondément ? Je l'ignore ; c'est à rechercher.

Que dans un ballon librement exposé à l'air on voie apparaître, au bou tde quelques semaines, de gros infusoires qui ne se montreraient pas dans mes ballons après quelques jours, je ne trouverais à cela rien que de très-naturel. En effet, tout le monde sait que les premiers infusoires des infusions sont toujours les plus petits ; jamais la vie ne débute par de gros infusoires. Or ces petits infusoires altèrent l'air promptement, lorsque l'air est en quantité limitée dans un ballon fermé. Les gros infusoires ne peuvent donc se montrer. Lorsqu'ils pourraient apparaître, il n'y a plus d'air pour les faire vivre.

Voulez-vous savoir avec quelle rapidité l'oxygène peut disparaître dans un de nos ballons, sous l'influence de la vie des petits infusoires ?

Le 2 juillet 1860, j'ai vu apparaître de petits *bacteriums* dans un ballon de 250 centimètres cubes, renfermant 80 centimètres cubes de liquide. Le 4 juillet, j'ai analysé l'air du ballon. Il renfermait :

| | |
|---|---|
| Oxygène | 4,3 |
| Acide carbonique | 11,3 |
| Azote par différence | 84,4 |
| | 100,0 |

Quoi qu'il en soit, je le reconnais, l'origine des gros infusoires est une question à examiner, qui exige des recherches particulières. Mais ne confondons pas des difficultés qu'un travail approprié résoudra facilement, avec des impossibilités, des objections radicales pouvant renverser toute une théorie.

Il y a dans le sujet une véritable objection, grave, sérieuse, capitale, à laquelle j'ai hâte d'arriver. Partisans et adversaires des générations spontanées, tout le monde admet que la plus petite quantité d'air commun mise au contact d'une infusion quelconque y détermine en peu de temps la naissance des mucédinées et des infusoires propres à cette infusion.

Cette manière de voir a toujours eu pour appui, au moins indirect, l'habitude prise et jugée indispensable par les observateurs, d'éloigner avec des précautions infinies, dans leurs expériences, l'accès de l'air ordinaire.

Dès lors les partisans des générations spontanées s'empressent de faire remarquer que si la plus minime portion d'air ordinaire développe des organismes dans une infusion bouillie quelconque, il faut de toute nécessité, au cas où ces organismes ne sont pas spon-

tanés, que dans cette portion si petite d'air commun il y ait les germes d'une multitude de productions diverses; et qu'enfin, si les choses sont telles, l'air ordinaire doit être encombré de matière organique. Elle y formerait un épais brouillard.

Voilà la grande objection des partisans de la génération spontanée, appuyée, comme on le voit sur une assertion proclamée vraie par les deux partis, assertion qui peut en quelque sorte se résumer ainsi : Dans l'atmosphère il y a continuité de la cause des générations dites spontanées.

Il est assez curieux de rechercher quelle est la source de cette assertion généralement admise. Si vous voulez des preuves directes, vous n'en trouverez pas. Ce sont de ces notions que l'on rencontre partout, partout regardées comme des principes bien établis, mais dont les preuves ne sont nulle part. Je crois que celle-ci a eu pour origine ce fameux mémoire de Gay-Lussac sur les conserves d'Appert, dont j'ai déjà parlé. C'est dans ce mémoire, remarquez-le bien, que Gay-Lussac, trouvant qu'il n'y a plus d'oxygène dans l'air des conserves, affirme que l'absence de l'oxygène est nécessaire pour l'inaltérabilité des conserves; c'est dans ce mémoire qu'il conserve du lait pendant deux mois en le faisant bouillir quelques instants chaque jour, pour chasser, dit-il, l'air dissous; c'est dans ce mémoire enfin que vous trouvez cette expérience classique sur le moût de raisin qui entre en fermentation après qu'il a été mis en contact de quelques bulles d'oxygène, bulles infiniment petites a-t-on dit et répété. En confondant toutes ces choses, faits et interprétations, un peu comme elles l'étaient dans le mémoire de Gay-Lussac, on en est venu à affirmer que la plus petite quantité d'air commun suffisait pour provoquer la fermentation et pour altérer les conserves d'Appert.

Et de là, comme je l'ai dit, l'objection très-judicieuse faite par les partisans de la doctrine de l'hétérogénie.

Mais nous allons reconnaître que l'assertion dont il s'agit est une grosse exagération, et que, comme on devait s'y attendre dans l'hypothèse de la dissémination des germes, il n'y a pas du tout dans l'atmosphère continuité de la cause des générations dites spontanées.

Les expériences suivantes me paraissent aussi simples que démonstratives.

Dans un ballon de 250 centimètres cubes environ je place 80 à 100 centimètres cubes d'une liqueur putrescible, par exemple de l'eau de levûre de bière. J'effile le col du ballon, puis je fais bouillir la liqueur pendant deux à trois minutes, et je ferme la pointe effilée à la lampe pendant l'ébullition, de manière à pratiquer un vide dans le ballon par le refroidissement. Si dans un tel ballon on fait arriver de l'air calciné, il ne provoque aucune altération.

Cela posé, ouvrons ce ballon dans un lieu déterminé. L'air s'y précipitera avec force, emportant avec lui toutes ses particules en suspension. Refermons alors la pointe à la lampe et abandonnons le ballon à lui-même. S'il n'y a pas d'altération du liquide, c'est évidemment que le volume d'air introduit ne renfermait rien qui pût amener l'altération de la liqueur. Et si l'on répète plusieurs fois l'expérience, on saisira en quelque sorte dans leur variété les germes disséminés dans le lieu où l'on aura fait les prises d'air.

Or on s'assure facilement, à l'aide de pareils essais, que l'on peut toujours prélever dans un lieu quelconque un volume notable d'air ordinaire, n'ayant subi aucune sorte de modification physique ou chimique, tout à fait impropre à déterminer des productions organisées quelconques dans un liquide éminemment putrescible.

On reconnaît également, en choisissant les époques pour un même lieu, ou des localités diverses à une même époque, que l'on peut à volonté augmenter ou diminuer le nombre des ballons qui s'altèrent. Que l'on ouvre par exemple deux séries de ballons, l'une dans la cour de l'Observatoire de Paris, l'autre dans les caves de cet établissement, dans la zone de température invariable où l'air est très-calme, il y aura toujours beaucoup plus de ballons qui resteront intacts parmi ceux qui auront été remplis dans les caves; et tout annonce que la totalité des ballons resterait sans altération si l'opérateur ne transportait avec lui des poussières et, par suite, des germes.

Voici des ballons qui ont été ouverts au mois de septembre 1860 sur la Mer de glace, au Montanvert, à 2000 mètres de hauteur. Sur vingt ballons, un seul a donné une production.

A la même époque j'ai ouvert sur le Jura, à 850 mètres d'élévation, vingt autres ballons pareils; cinq ont donné des productions organisées, et huit sur vingt en ont fourni dans la campagne, loin de toute habitation, au pied du premier plateau du Jura.

Il faudrait sans doute multiplier beaucoup ces essais. Mais enfin il est arrivé dans ces études préliminaires que la diminution des germes en suspension dans l'air a été en correspondance évidente avec la hauteur plus ou moins grande à laquelle on avait opéré.

Il en doit être ainsi. Ne voyons-nous pas, lorsqu'un nuage de poussière se forme, ce nuage avoir des limites peu éloignées. Sans doute une partie des corpuscules va plus haut, mais le nombre de ceux qui dépassent les limites visibles doit singulièrement diminuer avec la hauteur.

J'ai la conviction que des prises d'air faites à quelques mille mètres, avec un aérostat, établiraient que

l'air est à ces hauteurs d'une pureté parfaite. Seulement il faudrait de grandes précautions pour éloigner les poussières des vêtements de l'opérateur ou des objets qu'il emporte avec lui.

Vous voyez, messieurs, par les expériences que je viens de mettre sous vos yeux, toute l'exagération de cette assertion que la plus petite quantité d'air commun suffit pour déterminer dans une infusion la naissance des infusoires et des cryptogames propres à cette infusion. Ainsi dans ces expériences au Montanvert j'ai mis plusieurs litres d'air en contact avec la liqueur putrescible, et ce volume d'air relativement considérable n'a pas plus agi que de l'air qui aurait été calciné.

Mais, direz-vous, l'expérience de Gay-Lussac sur les grains de raisin, comment l'expliquer? Pourquoi réussit-elle? Il y a beaucoup à dire sur cette expérience. Elle me préoccupe depuis longtemps à divers points de vue, et j'espère me rendre tout à fait maître de l'explication qu'elle doit recevoir. Dès à présent nous pouvons remarquer la différence qui existe entre cette expérience et des essais de la nature de ceux que je viens de rapporter.

Dans l'expérience de Gay-Lussac les vases et les liquides n'ont pas été chauffés préalablement. L'éprouvette dont on se sert est toujours plus ou moins couverte de poussières, les grains de raisin également, le mercure lui-même en est chargé. La bulle d'oxygène que l'on introduit rencontre donc des germes de toute sorte, et comme l'une des productions qui se forment le plus facilement dans du moût de raisin est la levûre de bière, on comprend que ce soit le germe de la levûre de bière qui se développe de préférence, et de là la fermentation.

C'est ici le lieu de parler des inconvénients de

l'emploi de la cuve à mercure dans les expériences relatives aux générations dites spontanées. Dans mes premiers essais d'ensemencement des poussières qui sont en suspension dans l'air dans des liqueurs putrescibles, en présence de l'air calciné, j'opérai sur la cuve à mercure. Or toutes mes expériences à blanc réussissaient aussi bien que les autres. C'est qu'il est impossible de manipuler sur le mercure sans introduire dans les vases une partie des poussières qui sont à la surface du mercure ou sur les parois de la cuve, et jusque dans la masse même du liquide. Du jour où le mercure est sorti de la mine il est exposé aux poussières qui sont en suspension dans l'air et qui tombent à sa surface. Avez-vous jamais remarqué comment les choses se passent lorsque l'on enfonce dans le mercure un objet quelconque, par exemple un tube de verre, et qu'il y a à la surface du mercure une couche de poussière? Les poussières de la surface viennent se loger dans la gaîne comprise entre le mercure et le tube, et elles y viennent d'une distance d'un décimètre si on enfonce le tube d'un décimètre. De sorte que quand vous faites passer dans un ballon préparé avec beaucoup de soin, rempli d'un liquide qui a subi l'ébullition, un tube de verre dans certaines conditions, si vous croyez être à l'abri des germes étrangers, vous vous trompez, vous en introduisez un très-grand nombre.

Mais dans l'intérieur même du mercure il y en a toujours. Il n'y a pas de liquide plus propre à les cacher et à les retenir. Voici une expérience facile à répéter. On prend un ballon contenant un liquide organique qui a bouilli et vide d'air. On brise sa pointe au fond de la cuve. Le mercure rentre dans le ballon; on y fait arriver alors de l'air calciné ou de l'air artificiel. Eh bien, j'ai toujours vu au bout de peu de jours des

moisissures apparaître dans le liquide. Il est évident que c'est le mercure qui en avait apporté les germes.

Or c'est précisément là une des expériences de même ordre que celles que M. Pouchet avait produites lorsqu'il a soulevé de nouveau le débat sur la question des générations spontanées. Il renversait sur le mercure un ballon plein d'eau bouillante, y faisait passer un peu de foin qui avait été chauffé, puis de l'air calciné ou de l'air artificiel. Il avait des productions. C'est que le foin, lui dit-on, n'a pas été assez chauffé. Alors il le chauffa jusqu'à le carboniser. Il eut le même résultat. C'est, lui dit-on, que vous laissez rentrer de l'air ordinaire. Non. Là n'étaient pas les causes d'erreur. C'est le mercure qui apportait les germes, à son insu, et à l'insu de tout le monde. Supprimez en effet la cuve à mercure, et toutes les expériences prennent une netteté parfaite. Celles qui doivent réussir réussissent. Celles qui doivent échouer échouent. Il n'y a jamais d'exceptions, d'accidents quelconques, d'incertitudes d'aucune sorte.

Je m'aperçois, messieurs, que je me laisse trop aller au plaisir de répondre à l'intérêt que vous paraissez prendre à ces études. Le temps me presse, et j'avais encore plusieurs séries d'expériences à mettre sous vos yeux. J'aurais désiré vous parler de mes expériences sur le lait et en général sur les liquides légèrement alcalins. Vous auriez vu que dans ce cas une ébullition à 100° de deux à trois minutes ne suffit pas pour tuer les germes des infusoires-vibrions, ce qui fait que ces liquides se putréfient même en présence de l'air calciné. Mais il suffit d'élever de quelques degrés seulement la température de l'ébullition, pour que ces liquides se conservent intacts comme tous les autres en présence de l'air qui a été chauffé.

J'aurais désiré également vous parler des expériences

de productions d'infusoires et de cryptogames dans des liquides formés de principes en quelque sorte purement minéraux, tels que le sucre candi, les phosphates et les sels d'ammoniaque. Les théories sur l'origine des générations spontanées ne sont plus applicables ici. On ne peut plus invoquer *les forces génésiques* des matières albuminoïdes qui ont eu vie, puisque ces matières albuminoïdes sont supprimées.

Quoi qu'il en soit, messieurs, n'exagérons rien. Dans des sujets aussi délicats, sachons nous arrêter là où s'arrête l'expérience. Mon travail ne s'applique qu'à des infusions qui ont subi préalablement la température de l'ébullition. En ce qui concerne de semblables infusions, je regarde comme rigoureusement démontré par mes expériences que tous les infusoires et toutes les cryptogames qui s'y développent proviennent de germes qui sont en suspension dans l'air. Qu'un partisan de la doctrine des générations spontanées fasse telle supposition qu'il voudra au sujet des infusions qui n'ont pas été bouillies, je ne le suivrai pas, parce que je n'aurais plus l'expérience pour guide. Je suis en outre le premier à reconnaître que dans le sujet qui nous occupe il y a encore nombre de problèmes à résoudre, et, pour n'en citer que quelques-uns : quelle est l'origine des gros infusoires? D'où vient la différence que l'on remarque entre les infusions qui ont été bouillies et celles qui ne l'ont pas été, sous le rapport de la variété des productions organisées, notamment des gros infusoires? Qu'arriverait-il si l'on plaçait au contact de l'air calciné les liquides bruts de l'économie, non chauffés préalablement, tels que l'urine, le lait, le sang?

Ces questions méritent toute l'attention des naturalistes.

A côté d'elles, combien d'autres sujets d'études pleins

d'intérêt soulève le mode de vie de ces petits êtres réunis sous l'expression de générations spontanées! Je suis au milieu d'eux depuis plusieurs années, et il me semble que ma vie serait trop courte si je voulais aborder toutes les questions qui se pressent devant moi.

Aussi combien je m'étonne quand je vois l'histoire naturelle ne pas tendre la main à l'expérience, ne pas s'efforcer de transporter chez elle les vrais principes de la méthode expérimentale, qui a renouvelé dans l'espace de soixante à quatre-vingts ans les sciences physiques et chimiques, et par elles transformé pour ainsi dire toutes les conditions matérielles des sociétés modernes!

J'ai la persuasion que l'on ferait passer dans toutes les branches de l'histoire naturelle une séve nouvelle en y introduisant l'expérience, l'expérience vraie, celle qui mérite ce nom, l'expérience à la hauteur de l'état présent des sciences physiques et chimiques.

Plus j'avance dans ces études des êtres inférieurs, plus je suis frappé de l'insuffisance de la description pour arriver à la connaissance, je ne dirai pas seulement de leurs propriétés physiologiques et de leur rôle dans l'économie de la nature, — ceci pourra paraître évident, — mais bien plus, de leur place dans les classifications et même de la dénomination qu'il faut leur attribuer.

---

# TABLE.

PARIS. — IMPRIMERIE DE CH. LAHURE ET Cie
Rues de Fleurus, 9, et de l'Ouest, 21